



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

TESIS DOCTORAL

Optimización de la fabricación y verificación de cámaras de deriva para experimentos de física de partículas

Autor:
Manuel Daniel Leal

Director:
José Luis Pérez Díaz

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Leganés, Julio de 2009

TESIS DOCTORAL

OPTIMIZACIÓN DE LA FABRICACIÓN Y VERIFICACIÓN DE CÁMARAS DE DERIVA PARA EXPERIMENTOS DE FÍSICA DE PARTÍCULAS

Autor: Manuel Daniel Leal

Director: José Luis Pérez Díaz

Firma del Tribunal Calificador:

Firma

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Calificación:

Leganés, de de

A mis padres, mi mujer y mis hijos.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar, a mi director de tesis, Dr. José Luis Pérez Díaz, su apoyo y especial dedicación, no sólo en la elaboración de esta tesis sino a lo largo de mi trayectoria profesional en estos últimos años; y al Dr. Luciano Romero Barajas, su incansable estímulo, paciencia y crítica muy constructiva, así como el transmitirme sus conocimientos y experiencia en este tipo de detectores.

Mi agradecimiento también, a los doctores García-Prada y Díaz López por su motivación; al Dr. Díaz García, que ha sido compañero atento y fuente de ánimos; a mis compañeros del departamento de Ingeniería Mecánica de la UC3M, por su continuo apoyo; y a todos mis compañeros y amigos del laboratorio de diseño y fabricación de detectores del CIEMAT que participaron en los distintos trabajos que son objeto de esta tesis doctoral.

Especialmente, a mis padres por la confianza que siempre depositaron en mí, y a mi familia, Berni, Manuel y Alberto, por soportarme y padecer todas las inconveniencias que ha supuesto la realización de este trabajo.

RESUMEN

OPTIMIZACIÓN DE LA FABRICACIÓN Y VERIFICACIÓN DE CÁMARAS DE DERIVA PARA EXPERIMENTOS DE FÍSICA DE PARTÍCULAS

Autor: Manuel Daniel Leal

Director: José Luis Pérez Díaz

Programa de Doctorado en Ingeniería Mecánica y Organización Industrial.

En la presente tesis doctoral se ha diseñado, puesto a punto y verificado, un procedimiento de fabricación de cámaras de deriva para experimentos de física de partículas. Para conseguir esto, se han aplicado técnicas avanzadas de diseño mecánico, verificación metrológica y control de calidad. Mediante diferentes ensayos en las cámaras fabricadas, se ha podido validar dicho proceso y método. Podríamos resumir como conclusiones de este trabajo las siguientes:

- Se ha puesto a punto, inicialmente, un procedimiento de fabricación artesanal de cámaras de deriva.
- Se han diseñado, construido y ensayado, posteriormente, cuatro prototipos de cámaras de deriva estudiando sus prestaciones, funcionamiento y su proceso de fabricación y montaje, así como su calidad final.
- Se ha diseñado y construido utillaje para la fabricación de los prototipos y se ha verificado su validez mediante los ensayos realizados en su fabricación.
- Se ha propuesto un sistema de fabricación en serie de las cámaras, incluyendo utillaje y métodos de control de calidad; y se ha comprobado el cumplimiento de las tolerancias admitidas en las cámaras, validándose, por tanto, dicho procedimiento como adecuado.
- Se ha modificado el diseño inicial de las cámaras y del proceso, consiguiendo agilizar el procedimiento de fabricación por disminución del número de operaciones de ensamblado.
- Se han fabricado 74 cámaras mediante un proceso automatizado, resultando todas ellas operativas y conforme a las especificaciones del CERN.
- Se ha implementado una instalación en el CIEMAT, que incluye todo el equipamiento necesario para la construcción mecánica y pruebas de cámaras de deriva.

ÍNDICE

1. Detectores gaseosos	13
2. Cámaras de deriva	25
3. Grandes detectores de partículas	53
4. Fabricación artesanal de cámaras de deriva	65
5. Diseño de prototipos para CMS	91
6. Diseño y fabricación de utillaje	127
7. Diseño, construcción y verificación de mesas de precisión	149
8. Producción en serie de cámaras de deriva	175
9. Conclusiones	283
10. Anexo	285

CAPÍTULO 1

DETECTORES GASEOSOS

1.1.-FUNDAMENTOS

Las partículas ionizantes no se observan directamente. Es necesario desarrollar procedimientos y dispositivos para su detección, medición y análisis utilizando los efectos que producen al interactuar con la materia. Su mecanismo de interacción determinará la elección del detector adecuado para su estudio.

Estos dispositivos permiten la identificación de las partículas mediante medición de la energía depositada en el medio por las mismas o a través de métodos indirectos tal como la observación del radio de curvatura de su trayectoria en un campo magnético.

Los detectores gaseosos están formados básicamente por una cámara o contenedor metálico del gas con un ánodo en su interior, siendo el propio contenedor el cátodo (figura 1.1). El gas es generalmente una mezcla de gas inerte y gas orgánico.

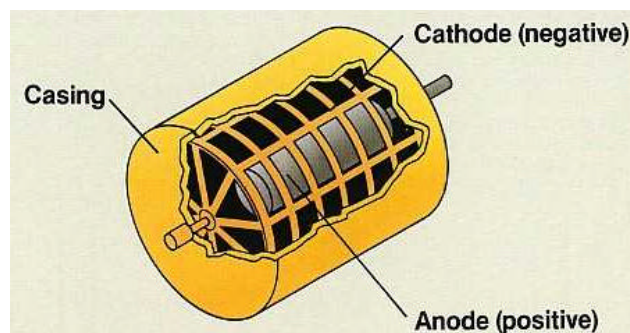
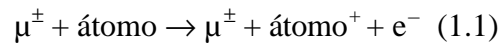


Figura 1.1.- Esquema de un detector gaseoso

Cuando una partícula lo atraviesa con una determinada energía superior al potencial de ionización del gas - unos 34 eV en las mezclas gaseosas más utilizadas -, provoca su ionización (1.1). Una parte de sus átomos se ioniza liberando iones positivos y electrones.

El gas, que primitivamente se comportaba como un aislante eléctrico, pasa a ser parcialmente conductor.



Midiendo la corriente eléctrica que circula por él, mediante un circuito amplificador eléctrico exterior acoplado al detector puede determinarse la energía de las partículas que pasan a su través.

1.2.- CLASIFICACIÓN

El funcionamiento de los detectores gaseosos, según el rango de tensiones aplicadas entre sus electrodos, da lugar a la siguiente clasificación:

1.2.1.- CÁMARAS DE IONIZACIÓN

Básicamente son detectores gaseosos de forma cilíndrica, siendo generalmente la pared exterior de uno de los electrodos metálica o metalizada en su superficie interna, y estando el otro constituido por una varilla o hilo central. Ambos electrodos están separados y soportados por un disco de material aislante (figura 1.2).

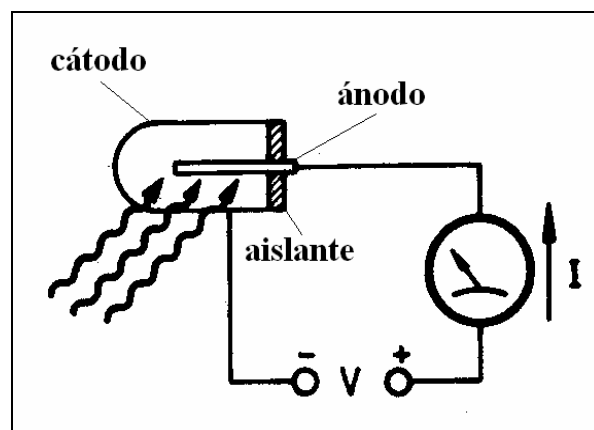


Figura 1.2.- Esquema de una cámara de ionización cilíndrica

Si entre los dos electrodos, ánodo y cátodo, se aplica una tensión eléctrica de 100 V, al ser el gas que llena el detector un buen aislante, en condiciones normales ninguna corriente eléctrica circulará entre ellos. Sin embargo, si una partícula cargada interacciona con el gas, provocará su ionización, creando pares de iones. El campo eléctrico existente, debido a la diferencia de potencial entre los electrodos, pondrá en movimiento las cargas liberadas de cada signo hacia el electrodo de signo contrario, siendo la velocidad de los electrones hacia el ánodo unas mil veces mayor que la de los iones positivos [1].

De esta forma, se originarán en el detector corrientes o impulsos eléctricos que circularán por un circuito exterior de polarización, configurando una señal eléctrica que detecta la presencia de la partícula incidente, y que puede indicar, en determinadas condiciones, la naturaleza y energía de dicha partícula.

Las partículas producen ionización en el gas que llena la cámara (ionización primaria). Para tensiones bajas, el campo eléctrico en la cámara es débil y el movimiento de los iones lento, resultando que muchos de ellos, después de formados, se recombinan de nuevo al colisionar elásticamente con los átomos del gas, no llegando a los electrodos; por lo que la corriente producida es mínima.

Al aumentar la tensión aumenta el campo eléctrico, incrementándose la velocidad de desplazamiento de los iones y electrones, y una proporción mayor de ellos alcanza los electrodos, incrementándose por consiguiente la corriente continua que atraviesa la cámara. Cuando el campo eléctrico es lo suficientemente elevado para que la recombinación prácticamente no se produzca, se consigue la recolección de casi todos los iones producidos en el gas, alcanzándose la corriente de saturación I_s (figura 1.3), que permanece constante aunque aumente la tensión dentro de ciertos límites (V_1 - V_2).

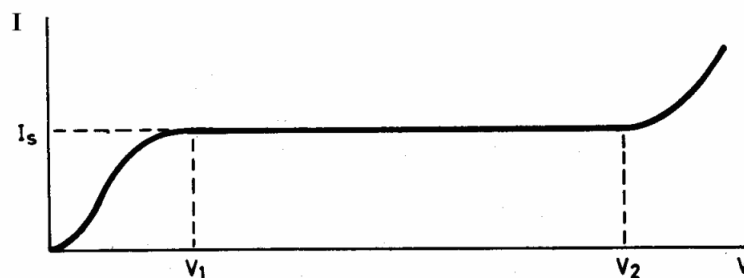


Figura 1.3.- Variación de I en función de V aplicada en una cámara de ionización

Si la tensión V se eleva excesivamente vuelve a aumentar la corriente, ello es generalmente debido a que los iones primarios formados por la partícula adquieren, en su movimiento hacia los electrodos, energía suficiente para ionizar por choque algún otro átomo del gas. Los nuevos iones así producidos vienen a incrementar la intensidad de corriente que atraviesa la cámara, fenómeno denominado ionización secundaria.

Mientras la tensión aplicada a la cámara esté comprendida entre los valores V_1 y V_2 , como se indica en la figura 1.3, la medida de la corriente de saturación I_s proporcionará la medida de la cantidad de partículas incidentes para un nivel constante de partículas atravesando la cámara. En general, la corriente generada en la cámara es muy débil, correspondiendo al número de electrones generado por las partículas incidentes ($\sim 10^{-12}$ A), por lo que será necesario utilizar un amplificador lineal de corriente para medirla.

Las cámaras de ionización se utilizan principalmente para la determinación de flujos o medidas de intensidad de fuentes de todos los tipos de radiación (figura 1.4) y si la ionización primaria se produce a ritmo constante, con suficiente intensidad, es posible mediante amplificaciones de los impulsos del detector, utilizar este sistema como contador de partículas cargadas (figura 1.5).



Figura 1.4.- Cámara de ionización de alta presión (RS-112)

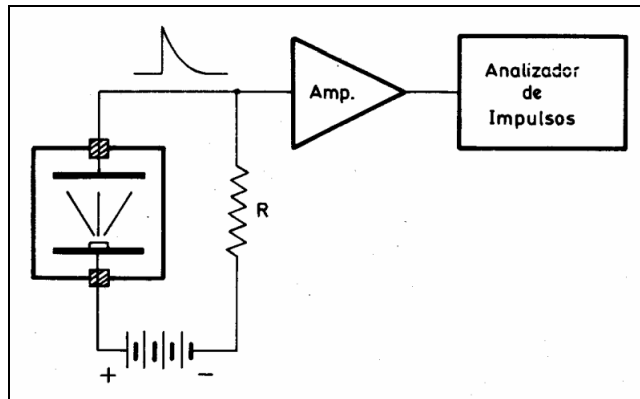


Figura 1.5.- Dispositivo para análisis de emisores alfa

1.2.2.- CONTADORES PROPORCIONALES

Según se ha visto anteriormente, cuando la tensión aplicada a una cámara de ionización es suficiente para que lleguen a los electrodos todos los iones directamente producidos por la partícula ionizante, el impulso formado en el colector alcanzará una amplitud que se mantendrá constante, aunque se eleve apreciablemente dicha tensión.

Sin embargo, si ésta aumenta lo suficiente, a partir de un cierto valor empieza de nuevo a aumentar el tamaño del impulso, aunque el número de iones primarios directamente producidos por las partículas a detectar no haya variado. Ello es debido a que los electrones primitivamente formados adquieren, en su camino a través de la cámara, energía suficiente para ionizar por choque a otros átomos neutros, liberándose cargas que pasan a engrosar la corriente inicial.

Los nuevos electrones libres son, a su vez, capaces de producir otros iones, formándose así una cascada o avalancha de cargas que aumentan considerablemente la amplitud del impulso obtenido en el colector.

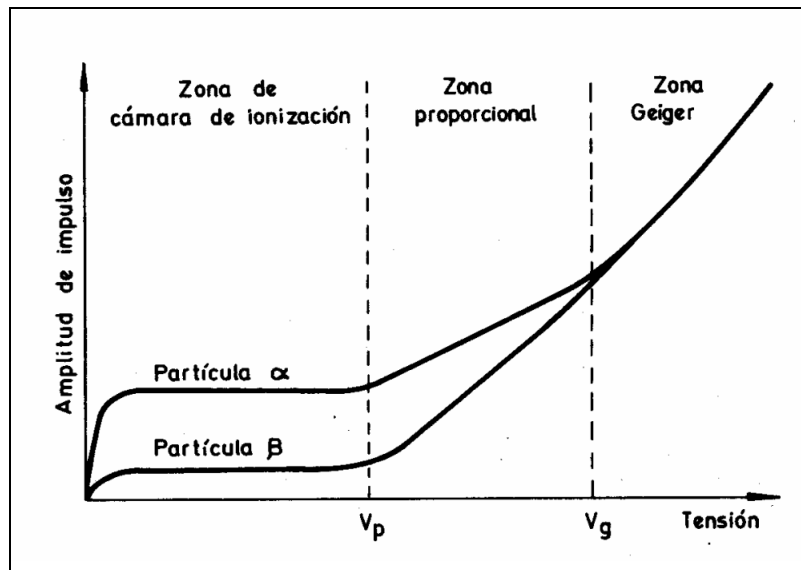


Figura 1.6.- Variación de la amplitud del impulso con la tensión

La figura 1.6 muestra la variación, en función de la tensión aplicada, de la amplitud del impulso originado por una partícula alfa y una beta que atraviesan una cámara cilíndrica. La partícula alfa produce una ionización primaria mucho más intensa que la partícula beta. Por ello, la corriente de saturación es mayor para la primera que para la segunda.

Alcanzada la tensión V_p a la que se inicia la multiplicación de iones en el gas, la cámara se convierte en un contador proporcional, cuyo montaje es idéntico al de una cámara de ionización cilíndrica y cuyo electrodo central o colector está formado por un hilo metálico muy fino (Figura 1.7). Si cada electrón primario producido directamente por la partícula ionizante origina A nuevos pares de iones, la amplitud total del impulso será A veces mayor que la que se hubiera producido en una cámara de ionización.

Al número A se le denomina factor de multiplicación gaseosa y su valor depende de la tensión aplicada [2].

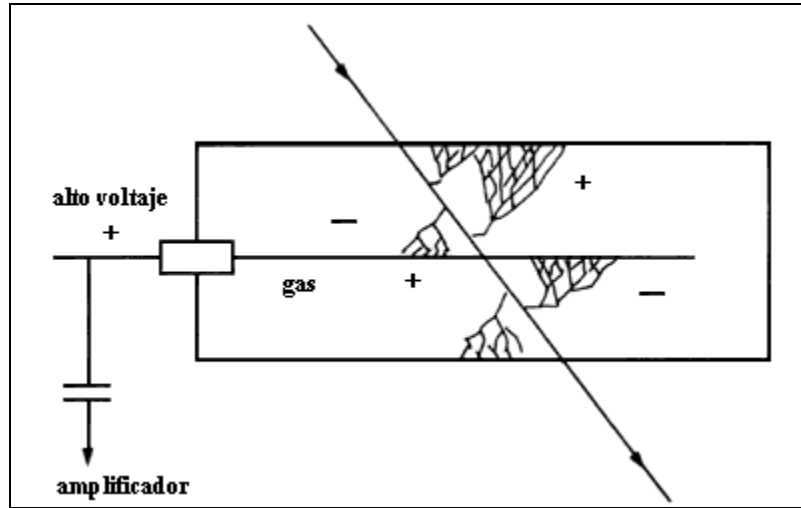


Figura 1.7.- Contador proporcional

Si el campo eléctrico adquiere valores elevados en las proximidades del ánodo, se produce una multiplicación de las cargas recolectadas (avalanchas) proporcional a la ionización inicial un factor del orden de $10^5 - 10^7$.

El campo eléctrico E en el interior de un detector gaseoso de geometría cilíndrica viene dado por la expresión:

$$E = \frac{1}{r} \cdot \frac{V_0}{\ln(r_2/r_1)} \quad (1.2)$$

donde V_0 es la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo, r es la distancia desde el centro del detector a un punto cualquiera de su interior, r_2 es el radio interior del cátodo y r_1 es el radio del hilo anódico (figura 1.8).

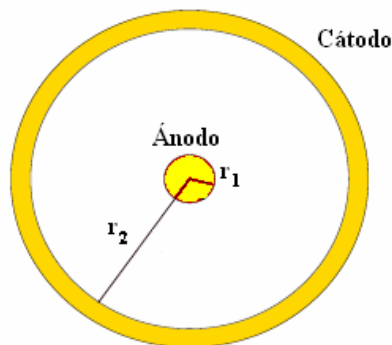


Figura 1.8.- Sección de un detector cilíndrico

Con los contadores proporcionales, al obtenerse impulsos mucho mayores que con las cámaras de ionización, se necesitan dispositivos electrónicos más simples para registrar y analizar los impulsos producidos. Por otra parte, a medida que aumenta el factor de multiplicación gaseosa el detector va perdiendo la facultad de distinguir entre partículas de la misma naturaleza y distinta energía, aunque puede y suele ser utilizado para distinguir partículas ionizantes de distinta naturaleza (figura 1.9).



Figura 1.9.- Contador proporcional de bajo fondo

1.2.3.- CONTADORES GEIGER-MÜLLER

Como indica la figura 1.6, si se eleva suficientemente la tensión aplicada a los electrodos de un contador proporcional, alcanzando el campo eléctrico valores del orden de 10^5 V/m, se produce la ruptura dieléctrica del gas, de tal forma que los impulsos resultantes llegan a hacerse todos de la misma amplitud, independientemente de la ionización primaria causada por la partícula o fotón detectados.

El contador proporcional pasa a denominarse contador Geiger-Müller (figura 1.10). En estos detectores se alcanza un factor de multiplicación gaseosa comprendido entre 10^8 y 10^{10} , considerablemente mayor que el que tiene lugar en un contador proporcional.



Figura 1.10.- Contador Geiger-Müller portátil

La amplitud de los impulsos resultantes es por tanto, ahora, mucho mayor [3], del orden de varios voltios ($= 10 \text{ V}$), no precisando amplificación; por lo que el equipo electrónico asociado a un contador Geiger es muy simple.

Durante su desplazamiento, los iones pueden ser acelerados y alcanzar el ánodo con la suficiente energía para liberar electrones y empezar el proceso de nuevo. Una vez producida la avalancha, los propios iones positivos apantallan el campo eléctrico en las cercanías del hilo, extinguiéndose la misma. Se produce entonces una recombinación de iones que origina una emisión de fotones y una producción de ionizaciones secundarias, que provocan avalanchas, dando lugar a un bloque de iones que enlaza ánodo y cátodo apareciendo una descarga en forma de chispa [4].

Para evitar que esto ocurra, se añade al gas principal otro gas con un número de grados de libertad elevado, que actúe como captador de fotones en este proceso, análogo al de un detector proporcional. Los iones positivos emigran al cátodo, intercambiando carga con estos gases poliatómicos (generalmente alcoholes o hidrocarburos), evitándose fotoemisiones y avalanchas secundarias.

Es de destacar la importancia de estos gases, llamados gases de extinción (?quenching gas?), compuestos por moléculas orgánicas complejas, al limitar el alcance de los fotones impidiendo la propagación de la avalancha a todo el volumen del detector. Una mezcla gaseosa típica es la constituida por 90% de Ar y 10% de metano (PR-10).

Con estos detectores no se pueden distinguir ni la naturaleza ni la energía de las partículas detectadas, ya que la amplitud de la señal eléctrica es independiente de ambas.

Por otra parte, la gran cantidad de iones positivos producidos en cada descarga del contador tarda entre 50 y 300 microsegundos en alcanzar el electrodo negativo, donde captan un electrón para volver a convertirse en átomos o moléculas neutras. En tanto esto no suceda, el contador no puede detectar una nueva partícula o fotón. A dicho intervalo de tiempo que sigue a cada detección y durante el cual el contador queda inactivo, se le llama tiempo muerto del detector.

Por ser mucho menor, en cambio, el número de iones formados en cada suceso de detección en un contador proporcional o en una cámara de ionización, el tiempo muerto de estos detectores es también mucho menor, del orden de unos pocos microsegundos. El tiempo muerto de un detector limita el número máximo de fotones o partículas que puede detectar por unidad de tiempo.

Si se coloca una fuente radiactiva de actividad constante a distancia fija de un contador Geiger asociado a su dispositivo electrónico de registro de impulsos, y se varía la tensión aplicada al contador, el número de impulsos contados por unidad de tiempo varía como se aprecia en la figura 1.11.

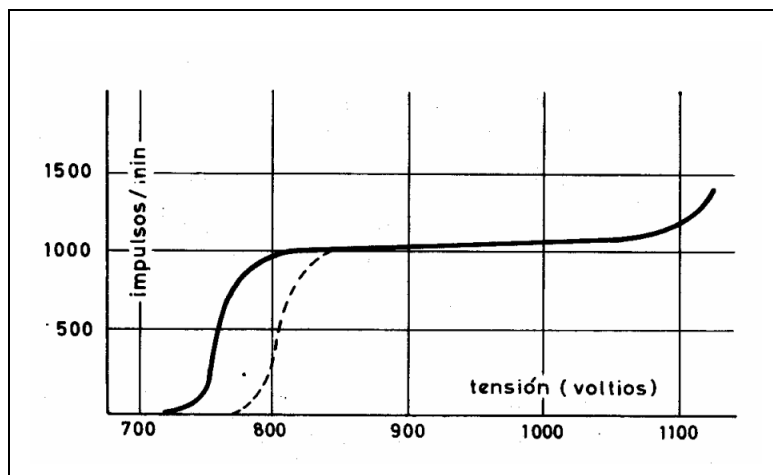


Figura 1.11.- Curva característica de un contador Geiger

Esta gráfica, que varía de unos contadores a otros, se denomina curva característica del mismo, y al intervalo de tensión en el que el número de impulsos es aproximadamente constante se le llama meseta, plateau, o más propiamente zona plana característica. Hacia el punto medio de dicha zona plana es donde debe fijarse la tensión de operación del contador Geiger considerado.

Si se continúa aumentando la diferencia de potencial entre electrodos, se produce una descarga en el gas debido a la alta intensidad del campo eléctrico. Esta zona no es de interés para la detección y provoca al trabajar en ella la destrucción del detector.

REFERENCIAS

- [1] Física nuclear. W. E. Burcham. Editorial Reverté. 1974.
- [2] Electron Avalanches and Breakdown in Gases. H. Raether. (Butter-worths, London, 1964).
- [3] High Energy Particles. B.Rossi. Prentice-Hall Incorporated, New York,1.961.
- [4] Radiaciones Ionizantes, Instalaciones Radiactivas y de Rayos X. A. Tanarro. JEN. 1.986

CAPÍTULO 2

CÁMARAS DE DERIVA

2.1.- INTRODUCCION

Las cámaras de deriva son detectores gaseosos muy utilizados en física de altas energías. Constituyen un caso particular de cámaras de ionización que surgen históricamente como un desarrollo de los detectores proporcionales [1]. Están basadas en el hecho de que, bajo determinadas condiciones, en gran parte del volumen gaseoso de detección se consigue una velocidad de desplazamiento de los electrones hacia el ánodo aproximadamente constante, siendo posible, de esta forma, el cálculo de la distancia al ánodo a la que se produjo la ionización inicial, mediante la medida del tiempo de llegada al mismo de los electrones.

Se utilizan, junto con imanes solenoidales, toroidales o dipolos, para determinar las trayectorias y el momento de las partículas cargadas, midiendo su curvatura en el campo magnético e identificándolas mediante el registro de la señal electrónica que se extrae en el ánodo [2].

2.2.- FUNCIONAMIENTO

Como se ha indicado, el principio general de funcionamiento de este tipo de detectores se basa en aplicar un campo eléctrico en su interior que impida la recombinación de los iones producidos por la partícula ionizante y permita su recuento [3]. Los detectores gaseosos, como se indicó en el capítulo 1, se pueden clasificar según el intervalo de tensión aplicado entre sus electrodos para su funcionamiento, en cámaras de ionización, detectores proporcionales y contadores Geiger-Müller, pudiéndose añadir, por sus especiales características, las cámaras de deriva.

En la figura 2.1 se muestra, la curva de Montgomery [4] para un detector gaseoso constituido por un cátodo de geometría cilíndrica. La gráfica representada es análoga a la de la figura 1.5 del capítulo 1, y representa la carga recolectada en un hilo anódico al paso de partículas cargadas ionizantes, en función de la diferencia de potencial aplicada. Se indican dos grupos de partículas, “a” y “b”, de los cuales el grupo “a” es el formado por partículas de mayor poder de ionización primaria, es decir, que producirán mayor número de iones al incidir en el gas.

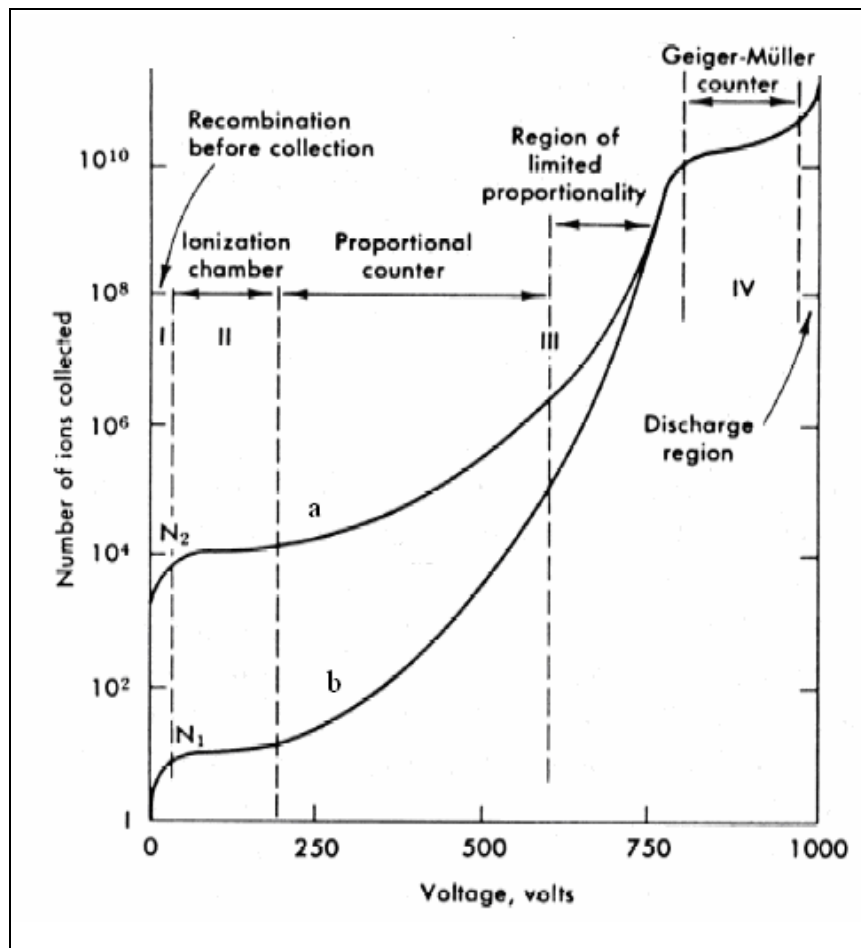


Figura 2.1.- Régimen de funcionamiento de un detector gaseoso

Las cámaras de deriva son contadores proporcionales, situándose su rango de funcionamiento en el intervalo más elevado de la zona III de la curva de Montgomery.

2.3.- DETECCIÓN POR DERIVA

En las cámaras proporcionales, el tiempo de resolución, tiempo mínimo entre ionizaciones que se pueden detectar, y el tiempo muerto en el que está inactivo el detector, dependen de la velocidad de deriva de los electrones en el seno del gas. Esta velocidad es la velocidad media de los electrones en su recorrido por el gas hacia el ánodo del detector.

A mayor velocidad de deriva se obtienen menores tiempos en el desplazamiento de los electrones hacia el ánodo, llamado también tiempo de vuelo y, por tanto, menores tiempos muertos en los contadores proporcionales.

En general, para pequeños valores del campo eléctrico la velocidad de deriva aumenta proporcionalmente al mismo e inversamente proporcional a la presión del gas. La relación E/p se denomina campo eléctrico reducido. Este aumento es lineal hasta que a partir de un cierto valor de E/p comienza a saturarse, pudiendo llegar incluso a disminuir al aumentar E/p .

Para anular este efecto, se utilizan mezclas de gases con saturación de la velocidad de deriva a bajos campos eléctricos [1]. Así, en determinadas circunstancias, la velocidad de deriva de los electrones para ciertas mezclas de gases, es constante y relativamente independiente del campo eléctrico reducido E/p . Por lo tanto, a partir de un cierto valor del mismo se puede medir la posición de la ionización inicial producida por la partícula respecto al hilo anódico, midiendo el tiempo de deriva de los electrones.

En la figura 2.2 se muestra el esquema de un detector de estas características, denominado cámara de deriva. Puede considerarse constituido por una región de campo eléctrico uniforme a lo largo de todo el camino de deriva, conformado por dos electrodos, a la que sigue la región de multiplicación que ha de ser del menor tamaño posible x_0 en las cercanías del hilo.

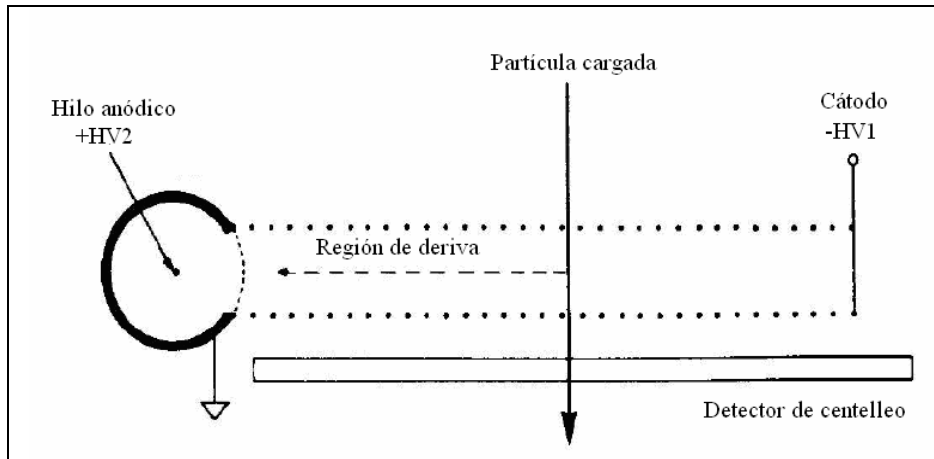


Figura 2.2.- Geometría elemental de una cámara de deriva

En la figura 2.3 se representan las líneas del campo eléctrico y potencial en una celda de deriva, en la que se ha mejorado la uniformidad del campo eléctrico mediante la colocación de electrodos adicionales que lo conforman.

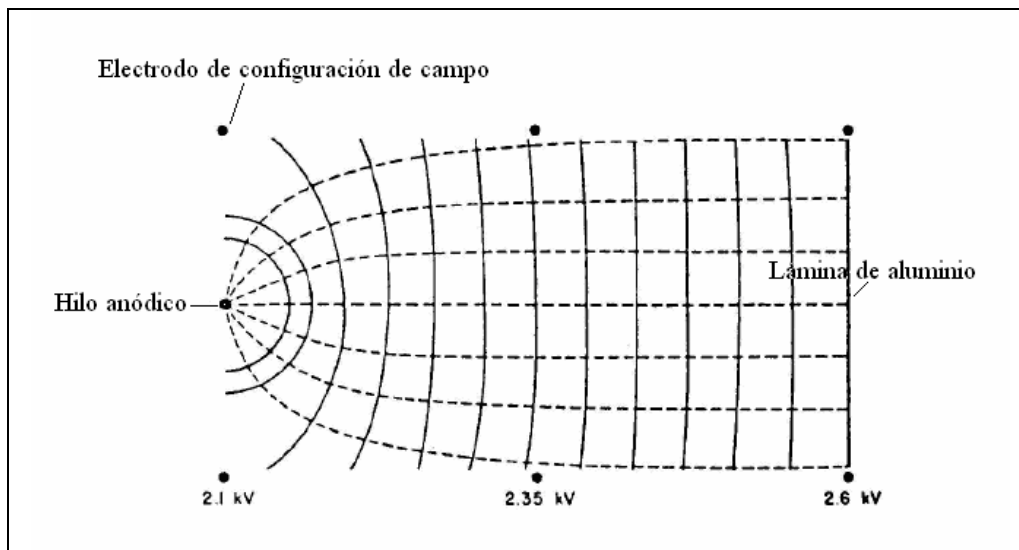


Figura 2.3.- Líneas de campo eléctrico y equipotenciales en una celda de deriva

Si consideramos una partícula cargada, que atraviesa la cámara de deriva produciendo una traza de iones, los electrones serán impulsados por el campo eléctrico, moviéndose en el seno del gas hacia la zona de multiplicación que rodea al hilo anódico con una velocidad $v_d(x)$, siendo x el punto de paso de la partícula. Con un sistema externo de referencia apropiado de disparo (trigger), como puede ser un detector de centelleo, se puede

determinar el instante en el que se produjo la ionización inicial. La señal del contador nos indicará el tiempo invertido por los electrones en alcanzar el hilo anódico. Este tiempo de vuelo vendrá dado por la expresión:

$$t = \int_{x_0}^x \frac{dx}{v_d(x)} \quad (2.1)$$

Es importante que el tamaño x_0 de la zona de multiplicación sea el menor posible, para mejor definición del tiempo de deriva. Eligiendo los potenciales de los electrodos y las mezclas de gases, se puede conseguir, con bastante aproximación, que la velocidad de deriva sea constante hasta llegar a x_0 , y que ésta sea bastante reducida. Si la velocidad de deriva es constante, la expresión (2.1) toma la forma:

$$t = t_0 + \frac{1}{v_d} \int_{x_0}^x dx \quad (2.2)$$

de donde se deduce que la distancia del punto en el que se ha producido la ionización al ánodo será:

$$x = v_d(t - t_0) + x_0 \quad (2.3)$$

donde t_0 es el instante en el que la partícula atraviesa el detector, que se mide como se indicó anteriormente, mediante una referencia externa, y que engloba el error sistemático en el origen de tiempos que es función del dispositivo experimental.

El diseño de una cámara de deriva está basado en el compromiso de diversos parámetros. En primer lugar, su geometría y los valores de las tensiones de trabajo existente entre sus electrodos, factores ambos que determinan el campo eléctrico y cuya elección está en función de las propiedades de deriva del gas o mezcla de gases utilizada. En segundo lugar, es preciso calcular la región de multiplicación, valorándola junto a la captura electrónica para todas las trayectorias de deriva. Por último, hay que estudiar los fenómenos de difusión y captura del grupo de electrones, procedentes de la ionización inicial, que afectan a la resolución y a la eficiencia del detector.

Por otra parte, es fundamental, en detectores de deriva, el tipo de electrónica utilizado para la amplificación y discriminación de las señales y el sistema de adquisición de datos.

Los procesos que tienen lugar en una cámara de deriva son fundamentalmente la ionización específica, la deriva de electrones, la difusión de iones y la captura electrónica, la multiplicación de los electrones y la detección.

2.3.1.- IONIZACIÓN ESPECÍFICA

La ionización específica es el número de pares de iones producidos por unidad de longitud por una partícula cargada a lo largo de su trayectoria, cuando atraviesa un medio de detección. El paso de una partícula cargada a través de un gas provoca colisiones inelásticas con los átomos o moléculas, dando lugar a su ionización o excitación; también se producen colisiones con los núcleos, radiación de frenado y de Cerenköv.

La ionización específica viene dada por la ecuación de Bethe-Bloch (2.4), que determina la pérdida específica de energía dE/dx de las partículas que atraviesan un medio material. Ésta energía por unidad de longitud depositada en el medio, se utiliza para detectar y, en muchos casos, identificar un amplio espectro de partículas de alta energía [5].

La ecuación de Bethe-Bloch, para partículas pesadas (muones, protones, etc...), viene dada por la expresión:

$$\frac{dE}{dx} = -K \frac{Zr}{Ab^2} \left[\ln \frac{2mc^2 b^2 E_m}{(1-b^2) I^2(Z)} - 2b^2 - d \right] \quad (2.4)$$

donde K es una constante de valor $0,0154 \text{ MeV kg}^{-1} \text{ m}^2$ para partículas con carga unitaria (protones, deuterones,...); r es la densidad del medio de detección; Z y A son los números atómicos y másico (nº protones + nº neutrones) del medio; m y e son la masa y la carga del electrón; b es la velocidad de la partícula (en unidades de la velocidad de la luz c); I es el potencial medio de ionización y excitación del medio gaseoso que varía linealmente con

Z de acuerdo con la expresión $I = 16 Z^{0.9} eV$ [6]; E_m representa la máxima transferencia de energía permitida en cada colisión.

La ecuación de Bethe-Bloch para electrones y positrones, viene dada por la fórmula (2.5):

$$\frac{dE}{dx} = -2Kmc^2 \left[\ln \frac{(m_e c^2)^2 \mathbf{b}^2 E_m}{(1 - \mathbf{b}^2)^{\frac{3}{2}} I^2(Z)} - \mathbf{a} \right] \quad (2.5)$$

donde \mathbf{a} es un parámetro adimensional de valor 2,9 para electrones y 3,6 para positrones.

Si el medio de detección es una mezcla de n gases, la ecuación viene dada por la expresión (2.6):

$$\frac{dE}{dx} = \sum^n \left(\frac{dE}{dx} \right)_n \quad (2.6)$$

Estas expresiones, debido al término logarítmico, producen un incremento de la pérdida de energía a partir de $10 GeV$. Sin embargo, efectos de polarización no considerados en ellas, producen una saturación cuando se alcanzan $100 GeV$.

La tabla 2.1 contiene los valores de los diferentes parámetros que intervienen en la ecuación de Bethe-Bloch, para gases normalmente empleados en detectores gaseosos, donde W es la energía necesaria para la formación de un par ión-electrón [5].

Gas	Z	A	$I_0(eV)$	$W(eV)$	$dE/dx(KeVm^{-1})$
Presión = 1 atm					
H_2	2	2.0	15.4	37	34
He	2	4.0	24.6	41	32
Ne	10	20.2	21.6	36	41
O_2	16	32.0	12.2	31	26
Ar	18	32.0	12.2	31	26
Kr	36	83.8	14.0	24	60
Xe	54	131.3	12.1	22	76
CO_2	22	44.0	13.7	33	01
CH_4	10	16.0	13.1	28	48
C_4H_{10}	34	58.0	10.8	23	50

Tabla 2.1.- Valores de parámetros de la ecuación de Bethe-Bloch para gases

La ionización específica total es, en principio, la pérdida específica de energía dividida por un factor constante, que es la energía media de ionización y que depende del medio. En la práctica, este valor también depende ligeramente de la energía de las partículas incidentes, al variar la sección eficaz de producción de electrones primarios, de energía suficiente como para poder ionizar a su vez y liberar nuevos electrones llamados rayos δ , que contribuirán a la ionización específica total. Esta pérdida de energía es función de la naturaleza de la partícula, lo que hace posible la identificación de partículas por la medida de la energía depositada en el medio detector.

En la figura 2.4 se representa la pérdida de energía en la ionización para varias partículas en función de su momento, y en ella se observa el comportamiento descrito por la ecuación de Bethe-Bloch.

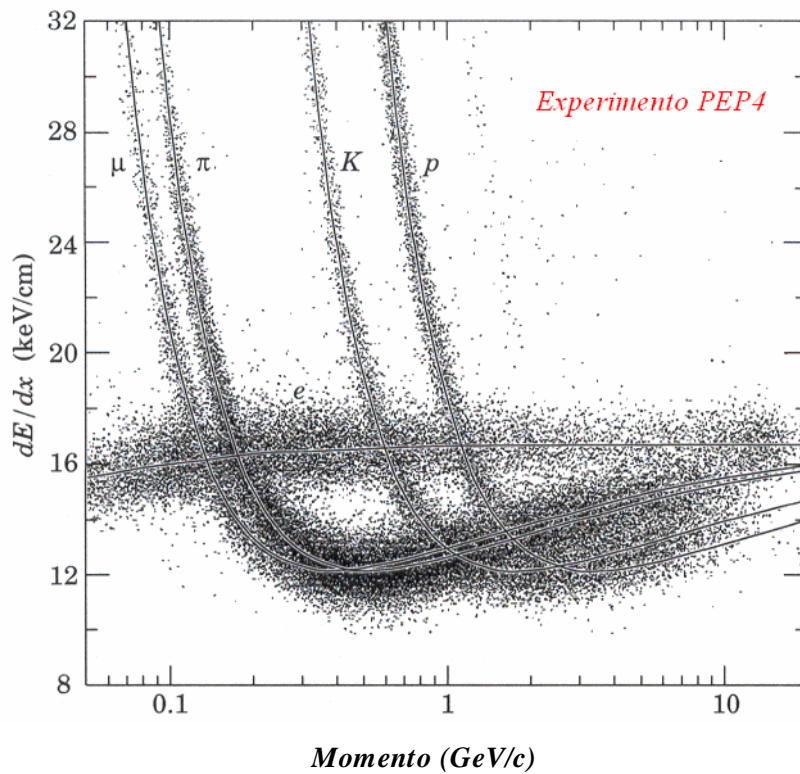


Figura 2.4.- Pérdidas de energía en la ionización de una mezcla Ar-CH₄ (80%-20%)

Para momentos por debajo de 1 GeV/c, dependiendo del tipo de partícula, la energía depositada decrece un factor $1/b^2$ hasta alcanzar un mínimo de ionización, tras el cual aumenta de nuevo (subida relativista) hasta adquirir un valor prácticamente constante. El

valor constante alcanzado se denomina Plateau de Fermi, el cual, para gases, es aproximadamente un 60% mayor que el valor mínimo de la ionización.

2.3.2.- DERIVA DE ELECTRONES

Si en un medio que contiene una nube de electrones o iones libres, se aplica un campo eléctrico inferior al necesario para producir multiplicación, se observa un movimiento neto de dicha nube, con una velocidad de deriva en la dirección del campo que no ha de confundirse con la velocidad térmica instantánea de cada partícula.

Generalmente, esta velocidad de deriva es función del campo eléctrico, la temperatura y la presión. La dependencia se puede expresar en función del campo reducido (cociente del campo eléctrico y la presión). Para campos bajos ($E/p = 0.5 \text{ V cm}^{-1} \text{ atm}^{-1}$ en gases nobles) esta velocidad es proporcional al campo reducido y la constante de dicha proporcionalidad es la movilidad (μ).

En el caso de valores mayores del campo reducido, se puede considerar una variación del tipo dado por la expresión (2.7)

$$v_d \propto \left(\frac{E}{p} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

La figura 2.5 indica la velocidad de deriva de los electrones en distintas mezclas de Neón, en función del campo reducido [7].

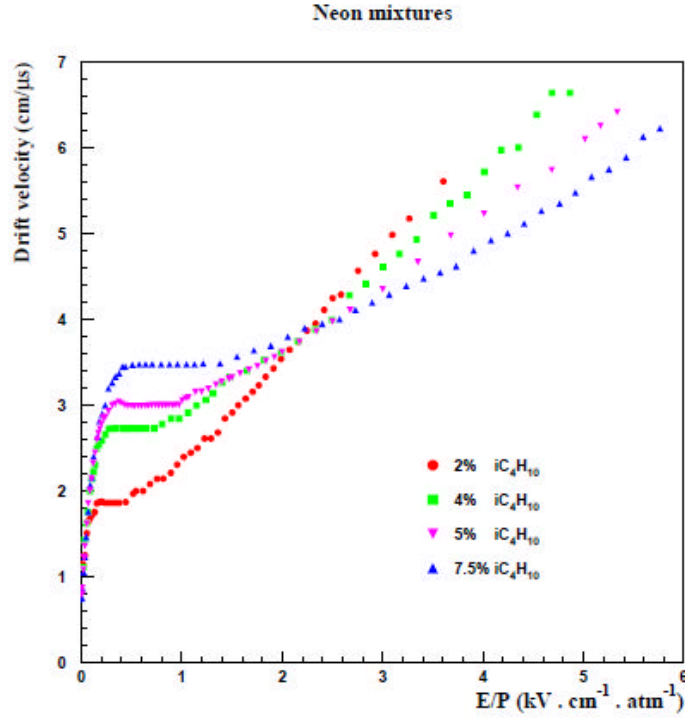


Figura 2.5.- Velocidad de deriva de los electrones en mezclas de Neón

El comportamiento de los iones es similar en términos generales, siendo sus velocidades de deriva, como se dijo anteriormente, mil veces menores que las correspondientes a los electrones.

La velocidad de deriva también se modifica por la presencia de un campo magnético. Si el campo magnético es paralelo al campo eléctrico, existirá una ligera modificación del módulo de la velocidad de deriva. Con campos magnéticos no paralelos al campo eléctrico, existe una componente de la velocidad de deriva en el sentido de $\vec{E} \wedge \vec{B}$, producida por la fuerza de Lorentz. En una primera aproximación, la velocidad total en la dirección del campo eléctrico vendrá dada por la expresión (2.8).

$$v_t = v_{d_{B=0}} \left[1 + \frac{eBl_e}{2mE} \right]^{-1} \quad (2.8)$$

donde E y B son los módulos del campo eléctrico y magnético respectivamente, l_e es el recorrido libre medio entre colisiones elásticas y m y e la masa y carga del electrón [5].

Así, para unas condiciones usuales de funcionamiento con $v_d = 5 \text{ cm}/\mu\text{s}$ en un campo eléctrico $E = 10^3 \text{ V/cm}$ y un campo magnético $B = 1 \text{ T}$, el segundo factor de v_t es del orden de $2/3$. Este efecto se manifiesta en la variación del módulo de la velocidad de deriva para un campo reducido dado, como puede verse en la figura 2.6, donde se presenta ese efecto para una mezcla usual de argón-etano para distintos valores del campo magnético [8].

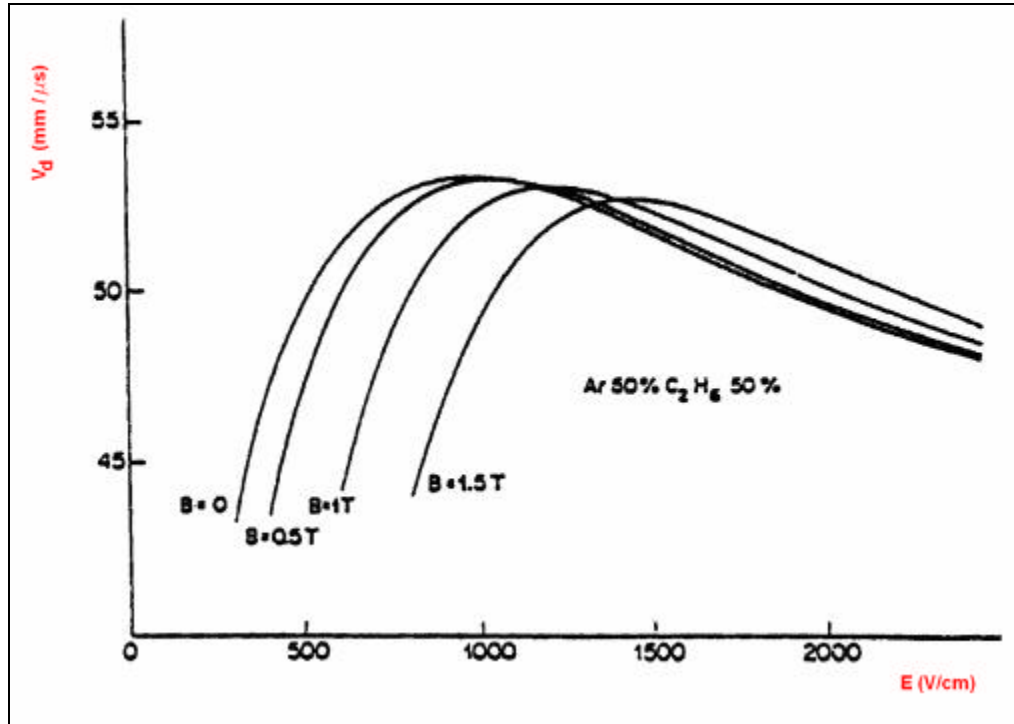


Figura 2.6.- Velocidad de deriva en función del campo eléctrico

2.3.3.- DIFUSIÓN Y CAPTURA

Las partículas de alta energía pierden la mayor parte de la misma en interacciones electromagnéticas con los átomos y moléculas del medio que atraviesan. Gran parte de estas interacciones producen ionizaciones primarias, liberando electrones y fotones que pueden producir a su vez nuevas ionizaciones, de forma que la ionización total resultante está formada por agrupaciones o racimos de iones y electrones (clusters). Estas nubes o racimos, debido al campo eléctrico existente (en una cámara de deriva), inician un movimiento hacia los electrodos.

A lo largo del camino de deriva se observa que la distribución espacial se ensancha tanto en sentido longitudinal como transversal. A este fenómeno de dispersión espacial de carácter gaussiano se le denomina difusión. La causa de la difusión es la colisión de esta nube de electrones con el medio, de forma que se suman las componentes isótropas a las velocidades instantáneas de la misma. Estas componentes dependen en gran medida, para cada medio, de la temperatura.

Este proceso, que para grandes desplazamientos hacia los electrodos tiene esencial importancia en la limitación de la resolución del detector, es posible describirlo mediante la ecuación de Fisch,

$$J = -D\nabla n \quad (2.9)$$

donde n es la concentración y J el flujo de electrones [9]. D es el coeficiente de difusión, característico del medio de detección y de sus condiciones, así como función de los campos eléctricos y magnéticos aplicados (figura 2.7).

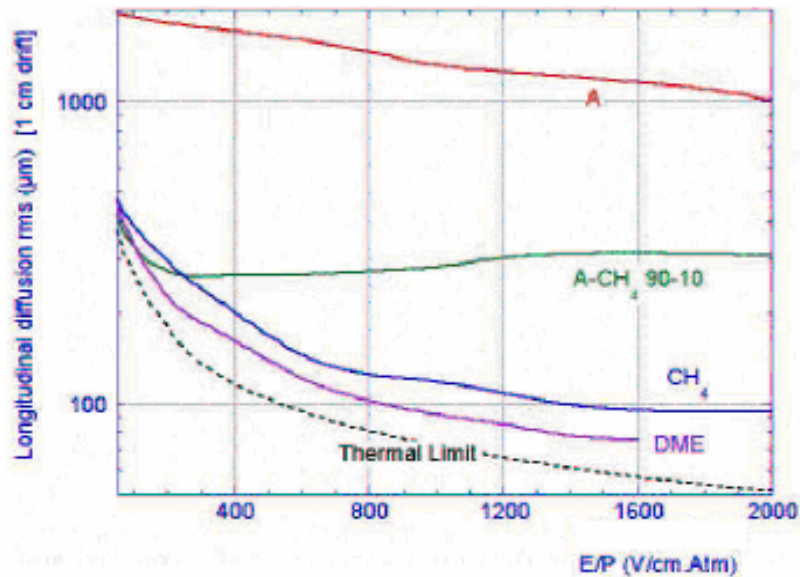


Figura 2.7.- Coeficientes de difusión para electrones en gases en función de E/P

El radio cuadrático medio de la distribución de posiciones de la nube de electrones está dado por la ecuación (2.10),

$$\mathbf{s}_x = \sqrt{2Dt} \quad (2.10)$$

donde D es el coeficiente de difusión y t el tiempo de deriva [9].

Se define \mathbf{e}_k como una función del campo eléctrico, denominada energía característica, que relaciona la deriva y difusión para cada gas, temperatura y presión:

$$\mathbf{e}_k = \frac{eED(E)}{v_d(E)} \quad (2.11)$$

siendo e la carga del electrón y E el campo eléctrico, por tanto la expresión de \mathbf{s}_x quedaría:

$$\mathbf{s}_x = \sqrt{\frac{2\mathbf{e}_k x}{eE}} \quad (2.12)$$

En el caso de que $\mathbf{e}_k = kT$ (donde k es la constante de Boltzman y T la temperatura absoluta del gas), la difusión en el gas se comportará en el denominado límite térmico:

$$\mathbf{s}_x = \sqrt{\frac{2kTx}{eE}} \quad (2.13)$$

Los gases en los que la difusión se comporta de esta forma son denominados gases fríos, y en ellos la difusión alcanza los valores mínimos. Un ejemplo puede ser el dióxido de carbono a 1 atm y un campo eléctrico de $2 \cdot 10^5 \text{ V/m}$. En estos casos \mathbf{s}_x puede alcanzar valores de 50 a 8 mm para 1 atm de presión y 1 cm de deriva [10].

La precisión con que se puede localizar la nube de electrones no viene dada directamente por \mathbf{s}_x , ya que esta medida depende también del número de electrones necesarios para el trigger o disparo del sistema electrónico de toma de datos. En cambio, los gases normalmente utilizados en cámaras de deriva (argón, hidrocarburos, etc.) y que presentan valores de \mathbf{s}_x superiores a este límite térmico, se denominan gases calientes. En

este caso, el valor típico para s_x es de 150 a 600mm para 1cm de deriva a 1atm de presión [10].

Hasta el momento se ha supuesto que la difusión es esférica; no obstante, el coeficiente de difusión presenta un carácter anisotrópico tanto mayor cuanto mayor es el campo eléctrico, como es el caso de los gases calientes, apareciendo dos coeficientes de difusión: el longitudinal D_L , en el sentido del campo; y el transversal D_T , perpendicular a él. Generalmente la difusión transversal en el sentido perpendicular al campo es de 2 a 4 veces mayor que la longitudinal. De esta forma, es posible obtener valores de la difusión longitudinal en el sentido del campo s_l del orden de 120mm . Esto sucede en la mezcla argón-isobutano (90% -10%) a 1atm , con un campo eléctrico de 1500 a 2000 V/cm y 1cm de desplazamiento [10].

La presencia de un campo magnético acentúa la anisotropía del coeficiente de difusión, afectando a la difusión en la dirección perpendicular al mismo, como se observa en la figura 2.8, poniéndose claramente de manifiesto la reducción de la difusión por compactación de la nube electrónica al incrementarse el campo magnético.

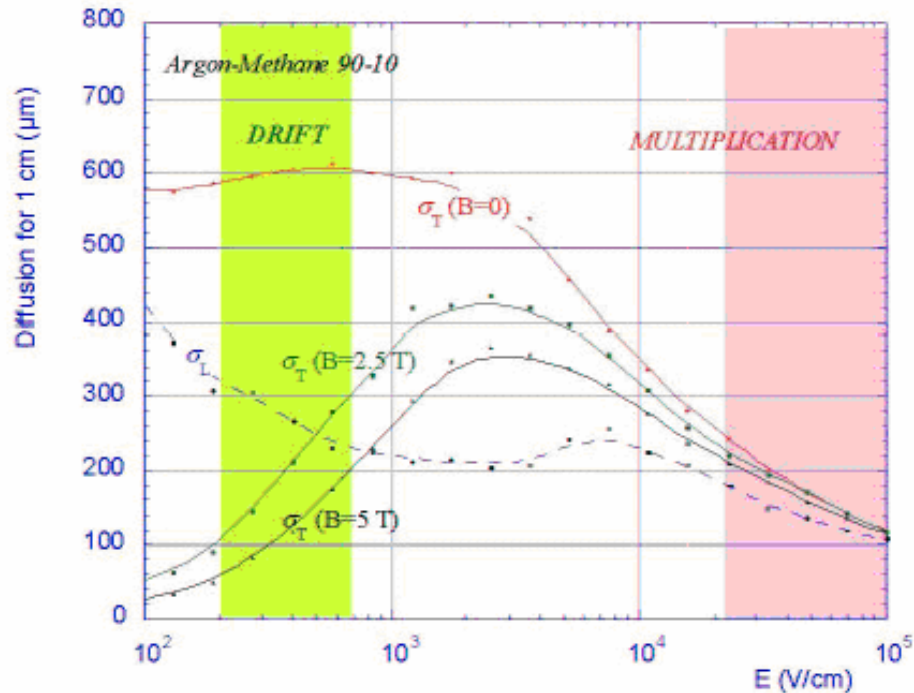


Figura 2.8.- Difusión transversal de electrones en función de E para distintos B

Se puede definir un nuevo coeficiente de difusión según la expresión (2.14):

$$D_B = D_{B=0} \left[1 + \frac{(eB)^2}{mv_d} \right]^{-1} \quad (2.14)$$

donde e y m son la carga y masa del electrón respectivamente, B el módulo del campo magnético y v_d la velocidad de deriva [9].

Otro fenómeno importante en el funcionamiento de un detector gaseoso es la captura electrónica. En este sentido, la existencia en el detector de compuestos con alta afinidad electrónica reducirá la eficiencia de detección, limitando el número de electrones que alcanzan el ánodo. Por lo tanto, los gases que contengan oxígeno, como el aire, y el vapor de agua, son contaminantes al poseer una elevada afinidad electrónica.

Estos gases se introducen en el detector por retrodifusión a través de imperfecciones en el sellado del mismo. La pérdida de eficiencia por captura es mayor, cuanto mayor es el desplazamiento de los iones o electrones.

2.3.4.- MULTIPLICACIÓN

Para que la detección de una partícula cargada sea eficiente, es necesario que el número de electrones que alcancen el ánodo del detector sea muy superior al número de electrones producido en la ionización inicial, requiriéndose una multiplicación de los mismos, de tal forma que la señal recogida por el detector active la electrónica, con una buena relación señal - ruido.

Cuando la energía que comunica el campo eléctrico a los electrones en cada recorrido libre medio, es superior a la que pierden en las colisiones, se llega a sobrepasar el potencial de ionización del gas. Si los electrones liberados en colisiones son también acelerados, dando lugar a nuevas ionizaciones, es posible la obtención de una multiplicación en el número final de cargas.

El factor de multiplicación A es el cociente entre el número total de cargas recogidas (n) y el número inicial de cargas (n_0). Se define el coeficiente de primera ionización a de Townsend [11], como el número de electrones producidos por multiplicación en el medio, para 1 cm de recorrido de un único electrón en la dirección del campo eléctrico. En las proximidades del hilo anódico este factor es proporcional a la presión y función del campo eléctrico reducido E/p .

Así, el número dn de electrones producidos en un recorrido dx desde las posiciones x_1 a x_2 será:

$$dn = n a(x) dx \Rightarrow n = n_0 \exp \int_{x_1}^{x_2} a(x) dx \quad (2.15)$$

El factor de multiplicación o ganancia A vendrá dado por la expresión (2.16).

$$A = \frac{n}{n_0} = \exp \int_{x_1}^{x_2} a(x) dx \quad (2.16)$$

Conociendo la dependencia de a con el campo eléctrico (figura 2.9), podremos obtener una expresión para el factor de multiplicación para cualquier configuración del mismo.

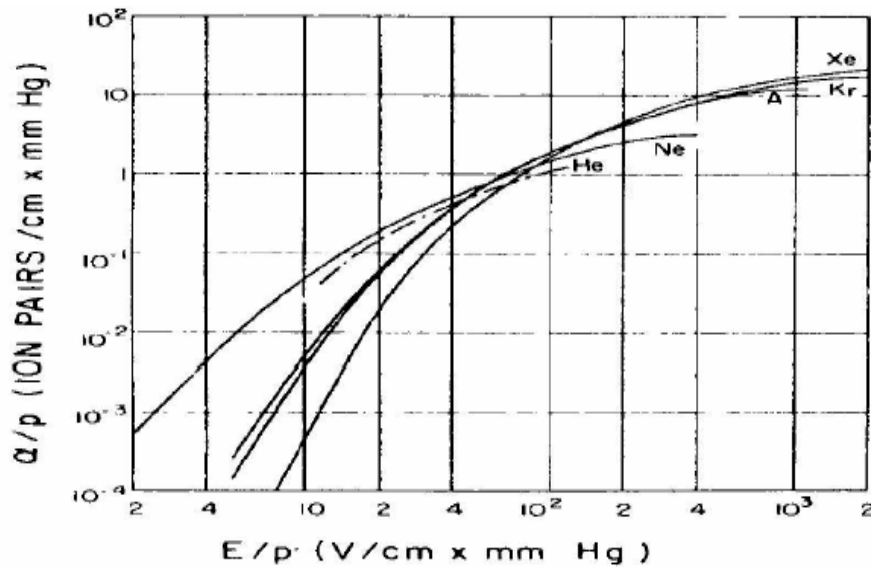


Figura 2.9.- Coeficiente de Townsend en función del campo eléctrico en algunos gases

Aunque A depende del campo eléctrico, no aumenta indefinidamente, puesto que el detector puede alcanzar la zona de descarga continua. El límite está dado por la condición de Raether, que da como valor máximo para la ganancia $A = 10^8$ [12].

En las proximidades del hilo anódico, el campo eléctrico $E(r)$, que es proporcional a $1/r$ crece exponencialmente, de tal forma que la multiplicación se produce muy rápidamente (< 1 ns) y de forma localizada, dando lugar a una avalancha de electrones.

Con un hilo de $50\mu\text{m}$ de diámetro, la región de multiplicación a presión atmosférica está entre 50 y $100\mu\text{m}$ de su centro [13]. Para una diferencia de potencial entre electrodos de 2000 V, y radio interior del cátodo de 6 mm, el campo eléctrico sería de 50 kV/cm.

Al ser la velocidad de deriva y el coeficiente de difusión muy diferentes para iones y para electrones, las avalanchas en las cercanías del ánodo, antes de alcanzarlo, se asemejarán a gotas con un frente ancho de electrones y una larga cola que se va estrechando, formada por una nube de iones que se desplazan lentamente hacia el cátodo (figuras 2.10).

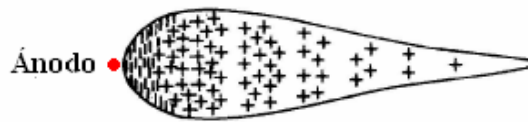


Figura 2.10.- Avalancha de electrones en las cercanías del ánodo

El proceso de formación de una avalancha cerca de hilo anódico se esquematiza en la figura 2.11.

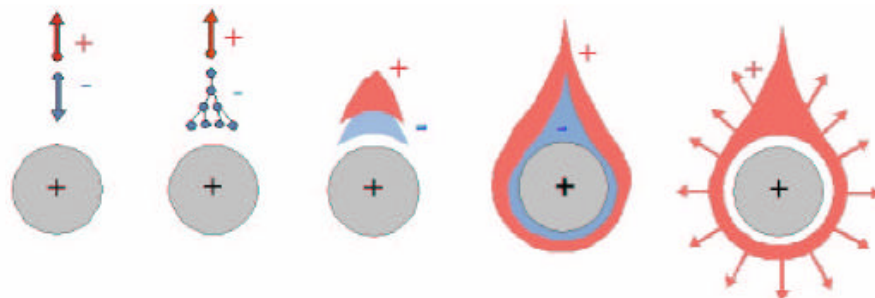


Figura 2.11.- Esquema de formación de una avalancha cerca del ánodo

2.3.5.- DETECCIÓN

Es el proceso mediante el cual la señal inducida en el hilo anódico se convierte en una señal lógica detectable por el sistema de adquisición de datos. La señal en el hilo anódico es proporcionada, principalmente, por los iones generados en la avalancha, que tienen una movilidad mucho menor que la de los electrones. La contribución de los electrones a la señal es aproximadamente de un 1 %.

Esta señal es debida a la energía que el circuito exterior debe suministrar para mantener las condiciones de campo eléctrico en el que opera la cámara. Cuando una carga se desplaza, la energía que adquiere en este desplazamiento la aporta el campo, es decir, el circuito exterior. El potencial $V(t)$ en el ánodo, en función del tiempo, es [13]:

$$V(t) = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0 L} \log\left(1 + \frac{t}{t_0}\right) \quad (2.17)$$

lo que indica la dependencia temporal de la señal recogida en el hilo; ϵ_0 es la constante dieléctrica del gas y L la longitud de la celda de deriva. Esta señal tendrá una duración máxima limitada por el tiempo T , de migración de los iones positivos al cátodo (figura 2.12).

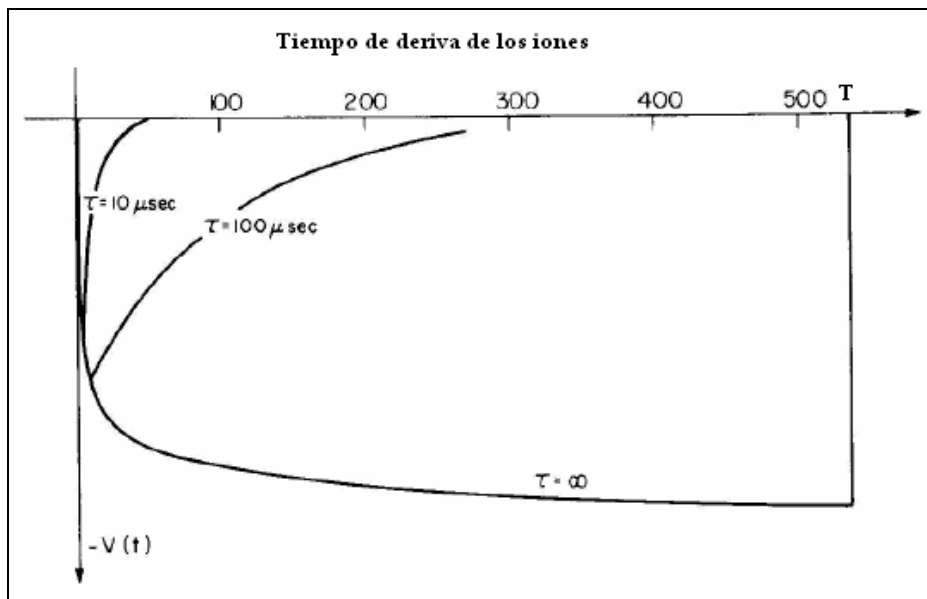


Figura 2.12.- Evolución temporal de la señal recogida en el ánodo para distintas $t = RC$.

Un amplificador operacional junto a un circuito RC de desacoplo de la alta tensión a los electrodos ($t = RC$), deriva la señal inducida y acelera la respuesta en tiempo, proporcionando una señal de salida derivada de la señal de entrada e identificando la iniciación de la avalancha.

2.4.- MEDIO DE DETECCION Y DERIVA

El medio de detección es el elemento o compuesto químico que constituye el volumen fiducial o sensible al tránsito de las partículas, es decir, el medio donde se produce la ionización y la deriva de los iones y electrones. En general suele ser un gas, aunque ciertos detectores se utilizan líquidos o sólidos. La elección del medio para un detector de deriva está condicionada a la aplicación específica a la que se destine.

2.4.1. GASES DE DETECCIÓN EN CÁMARAS DE DERIVA

La elección del gas adecuado es un parámetro fundamental en el diseño de un detector. Es necesario disponer de una ganancia elevada en la mayoría de los detectores gaseosos, para obtener una señal eléctrica de amplitud suficiente. Los gases en general presentan muy buenas condiciones como medio detector y, además, la cantidad de materia interpuesta en la trayectoria de las partículas es mínima (1 mg/cm^2).

Cualquier gas es susceptible de ser utilizado como medio de detección, si el campo cerca del hilo sensor es lo suficientemente elevado. No obstante, dependiendo del modo de operación y de la aplicación específica del detector, otros parámetros como propiedades de deriva adecuadas, proporcionalidad con la señal o pequeños tiempos de recuperación, influyen en la elección del mismo.

2.4.2.- CARACTERÍSTICAS

- Velocidad de deriva constante y estabilidad frente al campo eléctrico

Es necesario que la relación espacio temporal sea lineal y lo más estable posible. La linealidad se ve afectada por efectos geométricos. Así, si el detector es atravesado por una

partícula cuya trayectoria es inclinada, las ionizaciones se producen en posiciones no equidistantes del ánodo.

El comportamiento lineal se ve también perturbado, cuando el umbral de detección no es lo suficientemente bajo, ya que la llegada de una cantidad suficiente de electrones a la zona de multiplicación presentará variaciones en el tiempo, que dependerán del lugar en el que se haya producido la ionización primaria.

Si se producen variaciones locales del campo por imperfecciones en la geometría constructiva del detector, su funcionamiento también se vería afectado.

- Resolución aceptable

La resolución con la que se mide el punto de paso de la partícula depende de diversos factores. La difusión en el gas puede minimizarse mediante la adición de un gas frío como el CO_2 , que disminuye la energía característica, cuyo límite inferior es la agitación térmica del gas. El efecto de esta dispersión de la nube electrónica sobre la resolución depende del nivel de discriminación empleado.

- Comportamiento adecuado frente al campo magnético

El campo magnético modifica las trayectorias y disminuye la velocidad de deriva aparente. Este comportamiento es diferente según que el campo magnético sea paralelo o perpendicular al campo eléctrico; en el primer caso, la difusión disminuye. Estas distorsiones pueden provocar pérdida de electrones, afectando a la eficiencia de la detección.

Para evitar este efecto es necesario realizar un estudio experimental de la velocidad de deriva y del ángulo de Lorentz en distintos gases o mezclas gaseosas con diferentes campos magnéticos, eligiendo las condiciones de operación en las que este ángulo sea lo suficientemente pequeño, para no perturbar los requerimientos de eficiencia y resolución.

- Funcionamiento correcto frente a la multiplicación

El aumento en la proporción de gas frío disminuye la ganancia en la zona de avalancha. No obstante, este gas es necesario para garantizar la estabilidad del funcionamiento del detector. Por tanto, es preciso comprobar que el efecto sobre la ganancia, en la mezcla gaseosa utilizada, no afecta a su eficiencia y resolución.

2.4.3.- GASES MÁS UTILIZADOS

Los gases empleados generalmente como principal componente de las mezclas gaseosas utilizadas en los detectores de deriva son gases nobles. En los gases nobles, al ser gases monoatómicos, los electrones sólo sufren en su interior colisiones elásticas con bajas pérdidas de energía. Por tanto, es posible obtener un factor de multiplicación mayor para campos más bajos que con gases con moléculas más complejas, en los que se producen múltiples procesos de disipación no ionizantes, que disminuyen la eficiencia tanto en la ionización inicial como en la producción de avalanchas.

La elección del gas noble está condicionada por la necesidad de la máxima sensibilidad de detección, es decir, la mayor ionización específica. Como se observa en la tabla 2.2, a peso atómico más elevado, mayor es el número de iones por longitud de traza [9]. Se utiliza normalmente, por razones económicas y por su más fácil obtención, el argón.

Gas	Z	Densidad (g/cm ³)	L _R (m)	V ₀ (eV)	I ₀ (pares/cm)	I _t (pares/cm)
Hidrógeno	1	0,0898	7056	15,4	6	10
Helio	2	0,1784	5299	24,5	6	12
Neón	10	0,9003	322	21,6	12	50
Argón	18	1,7837	110	15,7	30	90
Xenón	54	5,8510	14	12,1	44	300

Tabla 2.2.- Parámetros característicos de distintos gases a presión atmosférica y 0°C

Como ya ha sido expuesto, los gases nobles poseen mayores eficiencias en la multiplicación gaseosa que cualquier otro gas molecular. En general, su uso en el detector no permite ganancias con valores de la multiplicación (A) superiores a 10^3 o 10^4 sin llegar al régimen de descarga continua.

La razón fundamental es que los átomos excitados e ionizados de los gases nobles decaen a su estado fundamental a través de emisiones radiativas, cuya energía mínima (11.6 eV para el argón) es muy superior al potencial de extracción del cátodo (7.7 eV en el Cu y 6

eV en el Al), de forma que los fotoelectrones extraídos inician nuevas avalanchas en el gas o cerca del cátodo, que se añaden a las correspondientes a la ionización inicial.

Si la probabilidad de estos procesos es suficientemente elevada, se puede alcanzar un régimen permanente de descarga.

Para evitarlo, es conveniente la adición de gases de amortiguación (quencher), capaces de absorber fotones de alta energía. Usualmente se utilizan gases orgánicos, como el isobutano o el metano, ya que la mayoría de los hidrocarburos y alcoholes son muy eficaces en este aspecto debido a sus múltiples grados de libertad y modos de excitación y vibración. Si se añade una pequeña cantidad de uno de estos gases, cambia totalmente las características operacionales del detector, alcanzándose ganancias de hasta 10^6 antes de alcanzar el régimen de descarga. El metano tiene una capacidad de absorción muy eficiente, entre 7.9 eV y 14.5 eV, que abarca las energías de los fotones emitidos por el argón.

Para detectores que requieran largos tiempos de deriva (cámaras de deriva o multihilos), es conveniente que el gas tenga buenas propiedades de deriva. Un factor importante es la pureza del gas, evitándose en lo posible la presencia de oxígeno y/o otros gases electronegativos que mermen la eficiencia del detector. Por otra parte, si el detector está funcionando con una alta frecuencia de partículas incidentes, su velocidad de deriva ha de ser alta para minimizar el tiempo muerto. En estos casos son adecuados gases como el dimetil-éter o el CO_2 (figura 2.13), pudiéndose obtener ganancias de 10^7 [12].

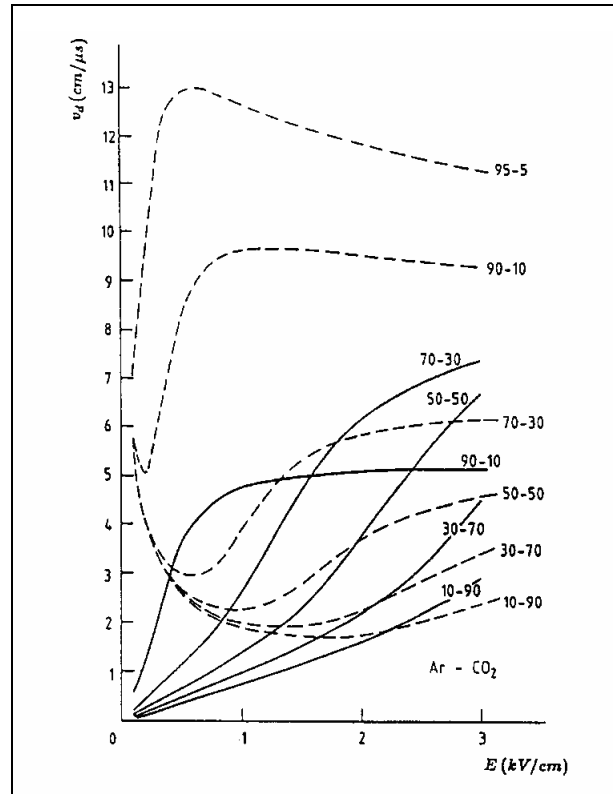


Figura 2.13.- Velocidad de deriva en función del campo eléctrico en mezclas Ar - CO_2

2.5.- CÁMARAS DE MÚLTIPLES CELDAS DE DERIVA

La utilización de cámaras de deriva para cubrir grandes superficies de detección implica el desarrollo de un nuevo tipo de estructura, que se puede denominar cámara de múltiples celdas de deriva, que contienen varias regiones de deriva, correspondientes a distintos ánodos en un mismo recinto de gas común, y en las que la configuración del campo eléctrico viene condicionada por las celdas adyacentes (figura 2.14).

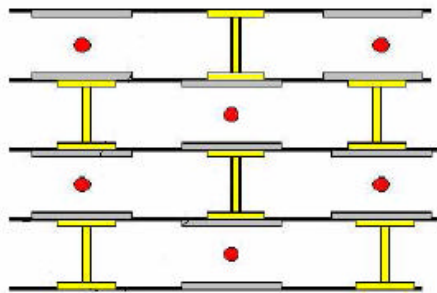


Figura 2.14.- Esquema de una cámara de múltiples celdas de deriva

Estas cámaras, frente al inconveniente de la mayor complejidad de cálculo y al hecho de que la rotura o mal funcionamiento de un hilo altere el comportamiento de los otros, presentan la ventaja de su mayor densidad de hilos sensores con una menor masa interpuesta a la trayectoria de las partículas. De esta forma, es posible medir múltiples puntos sobre la trayectoria de una partícula, con lo que se mejora la resolución [14] en un factor $1/\sqrt{n}$, donde n es el número de medidas, permitiendo, en su caso, una buena medida de la pérdida específica de energía.

2.6.- AMBIGÜEDAD IZQUIERDA-DERECHA

En las cámaras de deriva se puede conocer con relativa precisión la distancia del hilo anódico a la que se produjo la ionización, midiendo el tiempo de deriva; pero la simetría del campo eléctrico no nos permite conocer a qué lado del hilo se produjo. Esta incertidumbre es la denominada ambigüedad izquierda-derecha.

La forma más sencilla de resolver esta ambigüedad consiste en disponer dobles planos de detección, desplazando los hilos anódicos de una cámara respecto a los de la otra [15]. Este sistema presenta inconvenientes en el estudio de las trayectorias que incidan con grandes inclinaciones respecto a la trayectoria normal al plano de detección, siendo en este caso necesario utilizar tres planos de cámaras de deriva [16].

En el caso de cámaras de múltiples celdas de deriva se resuelve esta ambigüedad desplazando los hilos alternativamente (figura 2.15), una distancia del orden de 100 μm [16].

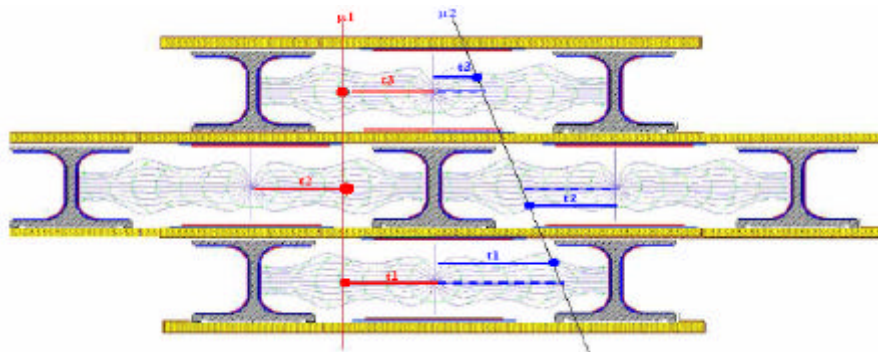


Figura 2.15.- Desplazamiento de hilos entre planos de detección de una cámara

2.7.- EXTRACCION DE SEÑALES Y SISTEMA ELECTRÓNICO

En las cámaras de múltiples celdas de deriva, generalmente se instala sobre el mismo detector, por cada hilo anódico, una electrónica previa de preamplificación y discriminación, que viene determinada por el hecho de que la medida de los tiempos de deriva, para la obtención de buenas resoluciones, ha de hacerse con gran precisión. Esto exige una adecuada calidad de los sistemas electrónicos desde el punto de vista de la información temporal. Tras la amplificación y discriminación, se conducen las señales al sistema de medida, análisis y almacenamiento de los datos.

Para mejorar la resolución se utilizan sistemas electrónicos que incluyen la utilización de convertidores del tiempo en información digital, TDC (Time to Digital Converter). Estos sistemas se basan en la generación de una señal analógica, cuya amplitud es proporcional al tiempo transcurrido desde que un detector rápido, por ejemplo un plástico de centelleo, produce el trigger inicial, y el momento de detectarse la avalancha en el ánodo de la cámara de deriva. Una vez producida esta señal analógica, se puede analizar su amplitud con gran resolución.

REFERENCIAS

- [1] The multiwire drift chamber, a new type of proportional wire chamber. A. H. Walenta, J. Heintze, B. Schürlein. Nuclear Instruments Methods 92(373) 1971
- [2] Central Detectors. A. Wagner. Physica Scripta, Vol. 23, 446-458. 1981
- [3] Method of Registering Multiple Simultaneous Impulses of Several Geiger's Counters. Bruno Rossi. Nature 125, 636 (1930)
- [4] Física Nuclear y de Partículas. Ferrer Soria, Antonio. 2.002
- [5] Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers. F. Sauli. CERN 77-09 (1.977)
- [6] Review of particle properties. Particle Data Group. M. Aguilar-Benítez et al. Physics Letters 170B (1986)
- [7] Electron drift velocity measurements at high electric fields. P. Colas et al. 2.001
- [8] Recent observations and measurements with high-accuracy drift chambers. A. Breskin et al. Nuclear Instruments and Methods. Volumen 124(189) 1.975
- [9] Rice-Evans, P. Spark, Streamer, Proportional and Drift Chambers (Richelieu Press, London, 1974)
- [10] Estudio y análisis de los parámetros de cámaras de deriva. L. Martínez Laso. Tesis doctoral. 1.988.
- [11] Electron in Gases. J. Townsend (Hutchinson, London, 1974)
- [12] A. Peisert, F. Sauli. Drift and diffusion of electrons in gases: a compilation. Technical report 84-08, CERN. 1984.
- [13] Particle Detection with Drift Chambers. W. Blum, W. Riegler and L. Rolandi. Springer. 2.008.
- [14] Drift-tube arrays for high spatial resolution. U. Becker et al. Nuclear Instruments and Methods, vol. 180, issue 1, pp. 61-63. 1.981

- [15] Multiwire driftchamber with high space and time resolution. Heinze, J., Walenta, A.H. Nuclear Instruments and Methods, vol. 111, (461). 1.973.
- [16] Drift-tube arrays for high spatial resolution. G. Charpak, F. Sauli and W. Duinke. Nuclear Instruments and Methods, vol. 108 (413). 1.973.
- [17] The Mark-II Vertex Drift Chamber. Nuclear Instruments and Methods. A283, 1989.

CAPÍTULO 3

GRANDES DETECTORES DE PARTÍCULAS

3.1.- INTRODUCCIÓN

En los experimentos de haces colisionantes [1] se aceleran dos haces de partículas que circulan en sentidos opuestos y que se hacen colisionar en un punto, llamado punto de interacción, cuando alcanzan una energía determinada.

Las partículas que aparecen tras la colisión de los haces se irradian en todas direcciones, por lo que es necesario que el detector sea esférico o cilíndrico para garantizar la cobertura de todos los ángulos sólidos (figura 3.1).

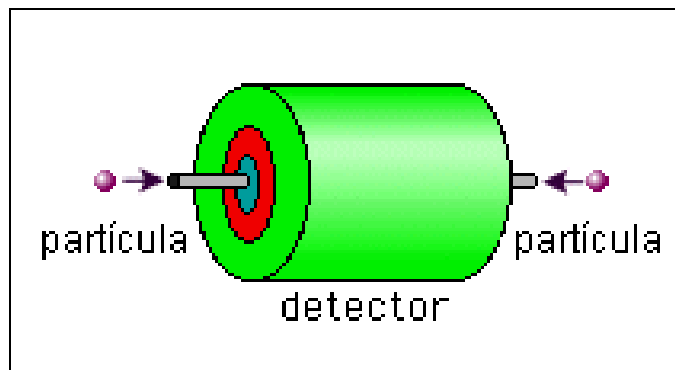


Figura 3.1.- Detector cilíndrico

La estructura general de los detectores modernos utilizados en física de partículas es cilíndrica, circulando los haces de partículas a lo largo de sus ejes (figuras 3.2 y 3.3).

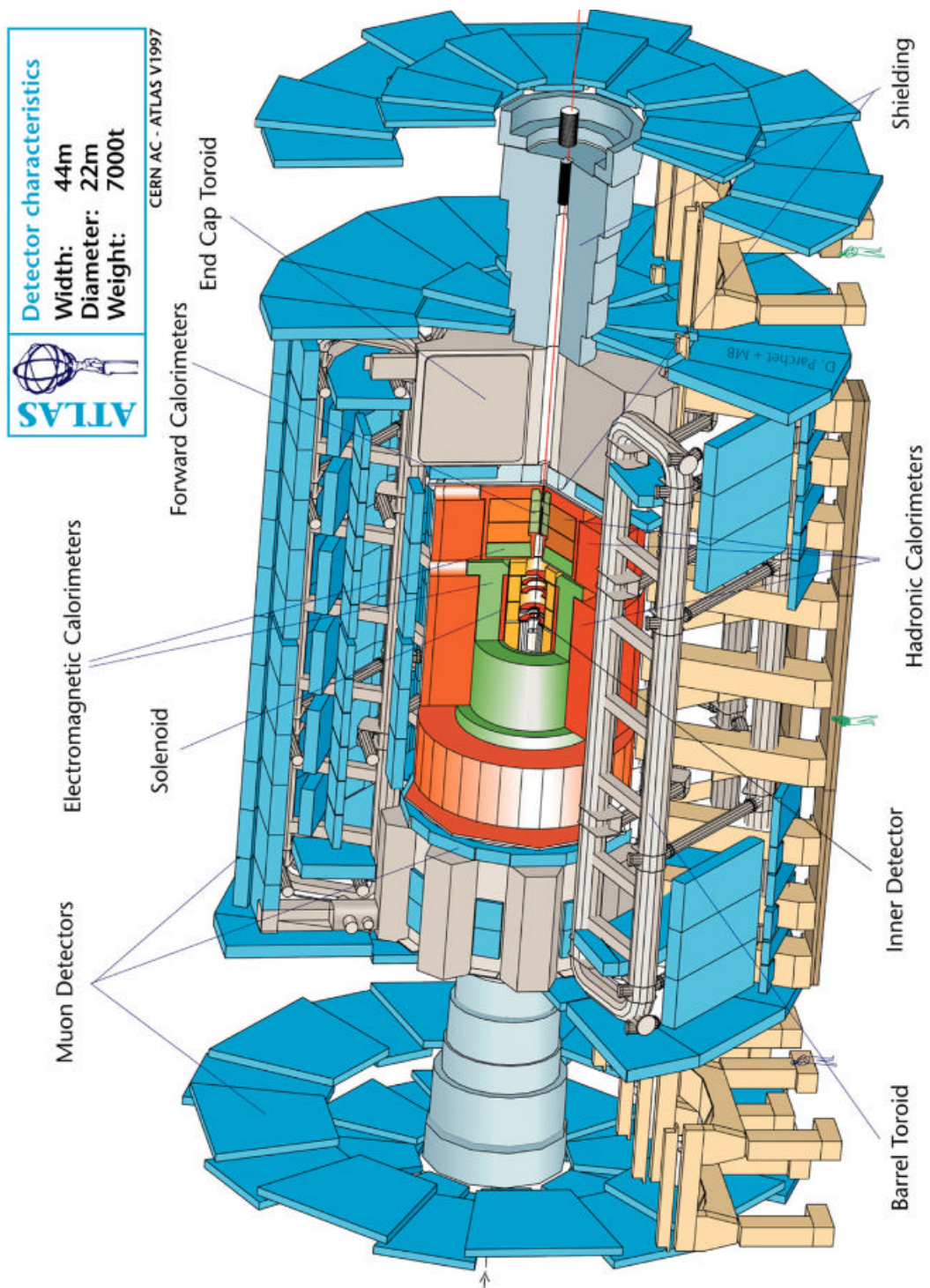


Figura 3.2.- Detector del experimento ATLAS del LHC

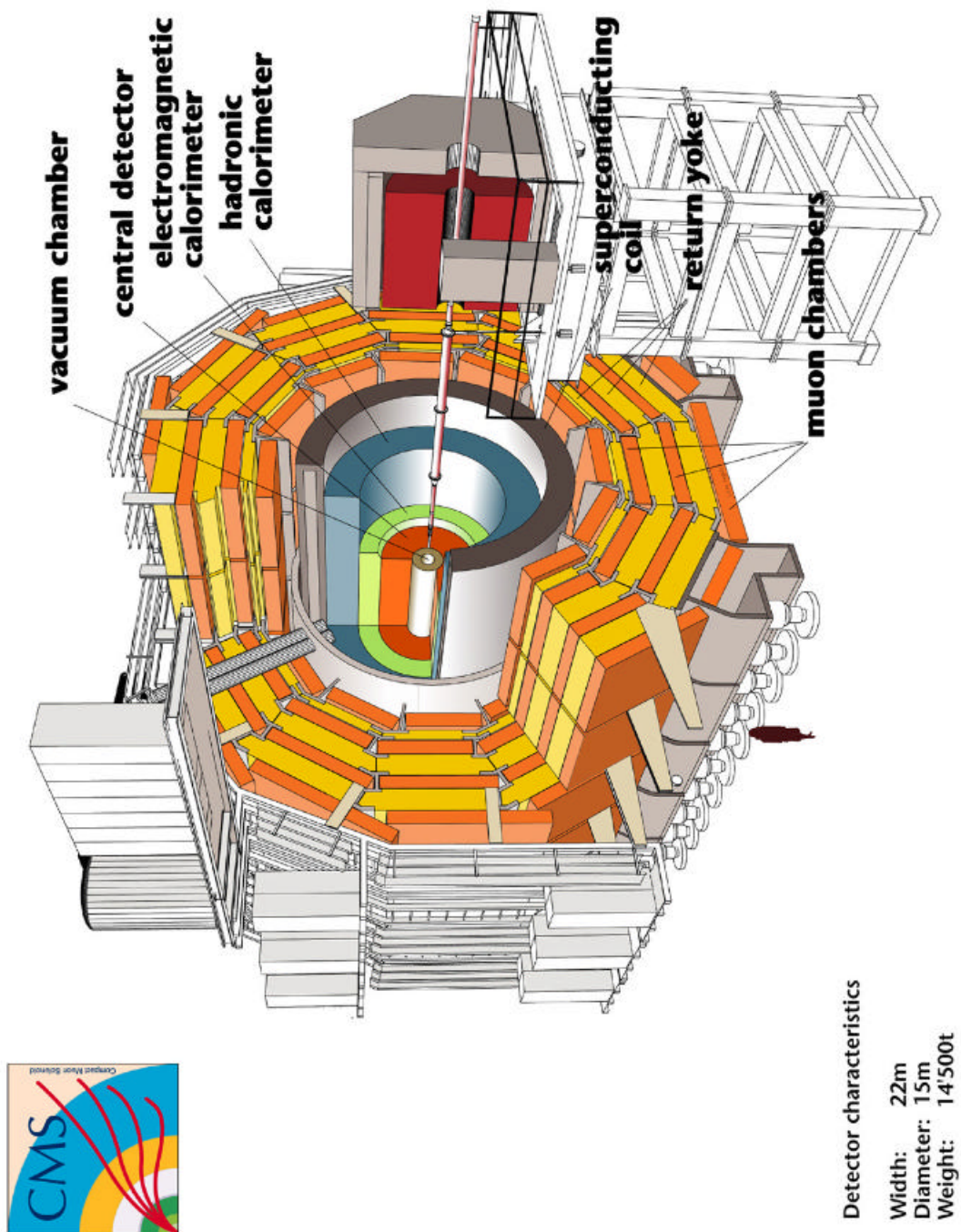


Figura 3.3.- Detector del experimento CMS del LHC

Los planos perpendiculares al eje del cilindro son los óptimos para la detección, al proyectarse sobre ellos las trayectorias espirales de las partículas inducidas por los campos magnéticos del imán del detector, pudiéndose calcular su energía. La proyección de la trayectoria sobre el eje nos indicaría su posición.

La estructura de estos detectores está formada por capas concéntricas alrededor del punto de interacción de los haces (figura 3.4). Cada capa es un dispositivo que tiene como misión específica detectar diversos tipos de partículas.

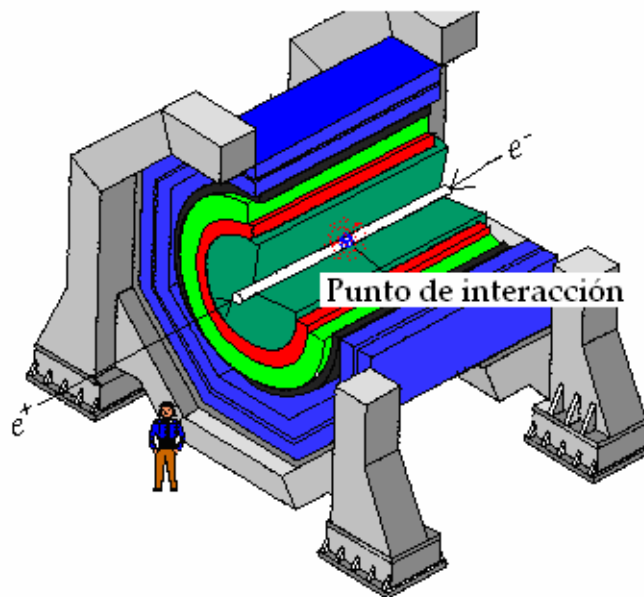


Figura 3.4.- Esquema usual de un detector

3.2.- DESCRIPCIÓN GENERAL

Los dispositivos que forman parte de un detector moderno de partículas desde el punto de interacción (PI) hacia fuera son (figura 3.5):

La cámara de rastreo, el calorímetro electromagnético, el calorímetro hadrónico, el imán y el espectrómetro de muones.

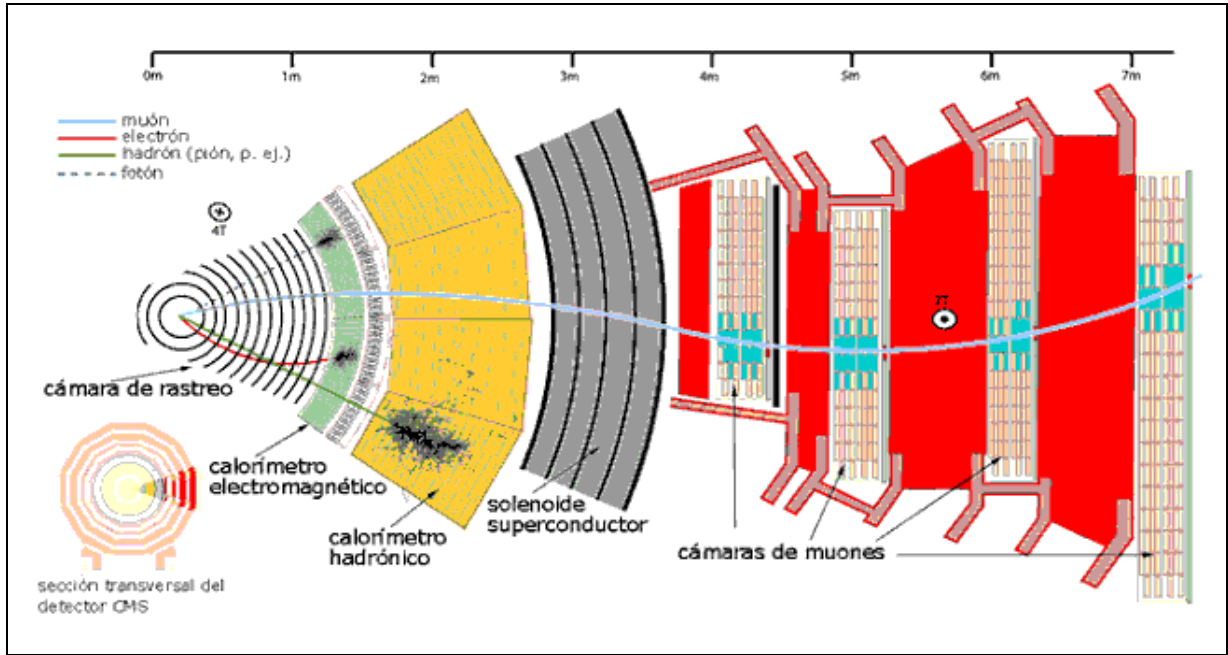


Figura 3.5.- Dispositivos subdetectores del detector del experimento CMS

3.2.1.- CÁMARA DE RASTREO

En las cámaras de rastreo (tracking chamber) se determinan con la máxima precisión las trayectorias de las partículas en una región cercana a la de la colisión, con el objetivo de determinar los puntos donde se originaron y poder calcular posteriormente sus momentos lineales para identificarlas.

Este detector central de trazas está formado, en L3, por dos cámaras de deriva cilíndricas (TEC = Time Expansion Chamber), rodeadas de dos cámaras proporcionales y el detector de microvértice [2]. En CMS, está formado por detectores de silicio rodeados por cámaras de gas de microbandas [3]

Este dispositivo debe estar libre de obstáculos que se interpongan en la trayectoria de las partículas y estar preparado para la adquisición de datos de cien partículas por colisión, con precisiones de entre unas diez milésimas de milímetro cerca del PI y un milímetro en la zona más externa. La región interna de este detector está formada por varios tipos de sensores segmentados (figura 3.5).

3.2.2.- CALORÍMETRO ELECTROMAGNÉTICO

Este detector tiene una gran resolución, tanto espacial como en energía, en su determinación para las partículas menos penetrantes, que están sometidas exclusivamente a interacciones electromagnéticas: fotones, electrones y positrones. Estas partículas producen cascadas de pares electrón-positrón en el medio de detección, cristales centelleadores de germanato de bismuto (BGO) en L3 y de volframato de plomo en CMS.

Los electrones y positrones son desviados por los campos eléctricos de los átomos irradiando fotones que, a su vez, producen pares electrón-positrón que irradiarán fotones etc... El número final de pares e^+ e^- producidos es proporcional a la energía de la partícula iniciadora.

Este calorímetro puede también distinguir las distintas direcciones en las que se ha depositado energía para asociarlas con trayectorias detectadas en la cámara de rastreo.

3.2.3.- CALORÍMETRO HADRÓNICO

Este calorímetro, junto con el electromagnético, se utiliza para determinar la energía total de los hadrones, partículas más penetrantes sometidas a interacción fuerte. Estas partículas que el calorímetro electromagnético no pudo detener, interactúan con un medio de detección más denso (U^{238} en L3 y cobre en CMS), dando lugar a una cascada de partículas cargadas.

La energía que depositan estas partículas cargadas es medida con posterioridad por cámaras proporcionales de hilos, en L3 [4]; y plástico centelleador y fibra óptica, en CMS [3]. El calorímetro hadrónico actúa además como filtro, permitiendo que sólo las partículas mínimamente ionizantes alcancen el detector de muones.

3.2.4.- IMÁN

La trayectoria de una partícula cargada se curva dentro de un campo magnético coincidente con el eje del detector (0.5 T en L3 y 4T en CMS). El radio de curvatura y la

dirección de su trayectoria indican el momento lineal de las partículas y el signo de su carga.

3.2.5.- ESPECTRÓMETRO DE MUONES

El espectrómetro está constituido por cámaras de deriva que registran las trayectorias de los muones [5] con gran precisión. Tienen su propio campo magnético para calcular también los momentos lineales de estas partículas, y suelen estar constituidas por gruesas planchas de acero. Los muones y los neutrinos son de las pocas partículas capaces de llegar hasta estos detectores. Los muones no participan en la interacción fuerte y no se ven tan afectados por la interacción electromagnética como electrones y positrones, por ser su masa unas doscientas veces mayor.

Sólo los muones son detectados, logrando escapar los neutrinos [6], al interactuar muy débilmente con el medio detector. La presencia de éstos se deducirá por la pérdida de energía en las cámaras.

3.3.- DETECCIÓN

La razón por la cual los detectores están divididos en subdetectores es que cada uno de ellos evalúa un grupo especial de propiedades de las partículas. Estos subdetectores están apilados formando capas, de tal forma que todas las partículas pasarán por las diferentes capas secuencialmente. Una partícula no será detectada hasta que no interactúe con el detector en un modo medible, o bien se desintegre en partículas detectables.

Las partículas cargadas, tales como los electrones y los protones, son detectadas tanto en la cámara de rastreo como en el calorímetro electromagnético. Las partículas neutras, como los neutrones y fotones, no son detectables en la cámara de rastreo; sólo quedan en evidencia cuando interactúan con el detector. Los fotones son detectados por el calorímetro electromagnético, mientras que los neutrones se evidencian por la energía que depositan en el calorímetro de hadrones. Cada tipo de partícula deja su propia huella en el detector (figura 3.6).

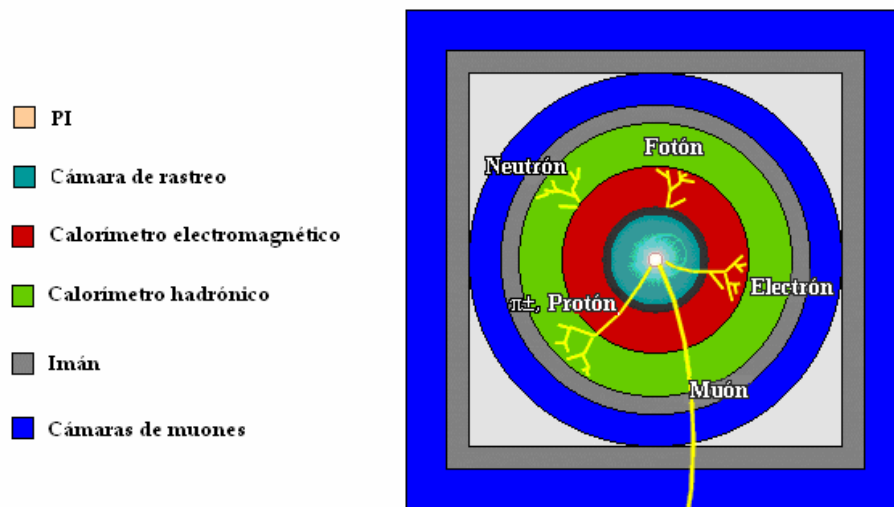


Figura 3.6.- Confinamiento de partículas en una sección de un detector

Si una partícula cargada es absorbida por el calorímetro electromagnético, será probablemente un electrón o un positrón, salvo si no deja rastro en la cámara de rastreo, pues entonces se tratará de una partícula neutra, probablemente un fotón. Si deposita toda su energía en el calorímetro hadrónico, es probable que se trate de un hadrón, pero si lo atraviesa y es detectada en la cámara de muones, se tratará de un muón.

3.4.- ESTRUCTURA DEL ESPECTRÓMETRO DE MUONES

Las cámaras de deriva del espectrómetro se estructuran en capas concéntricas, formadas por varias cámaras planas de sección rectangular. Estas capas tienen una geometría poligonal en la sección perpendicular a los haces colisionantes, muy aproximada a la geometría cilíndrica (figura 3.7).

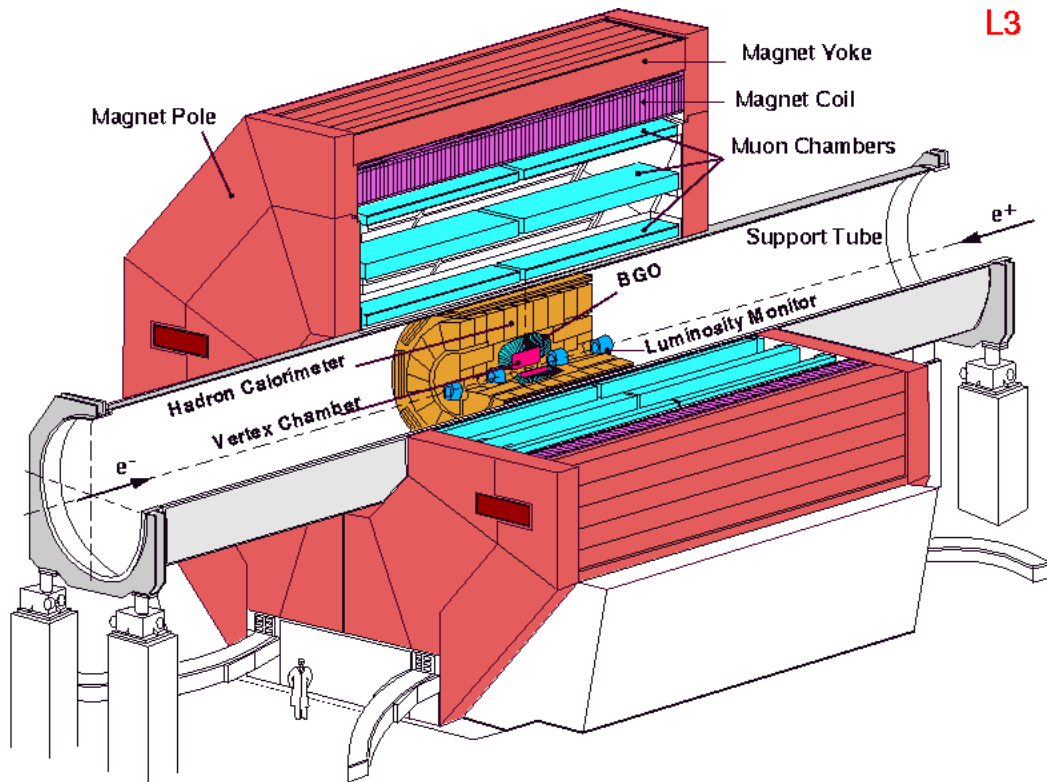


Figura 3.7.- Detector L3 del acelerador LEP

La geometría poligonal adecuada, será la de polígonos con número par de lados, para obtener estructuras simétricas. Es habitual la construcción de al menos octantes de cámaras de muones apiladas, ya que estructuras poligonales de menor número de lados (hexágonos) darían lugar a cámaras de gran tamaño, siendo en estos casos excesivo para abordar su fabricación en serie [7]. Estructuras poligonales con mayor número de lados, tendrían como inconveniente el aumento de las uniones entre cámaras en el detector, para formar las capas.

La planitud de las cámaras de muones facilita su fabricación y posterior colocación, así como su posible substitución en el detector, permitiendo además su almacenamiento por apilación.

3.5.- EL EXPERIMENTO CMS

El experimento CMS, es uno de los 4 experimentos (figura 3.8 Y 3.9) asociados al acelerador LHC (Large Hadron Collider) del CERN. LHC ha utilizado la infraestructura de

aceleradores del CERN, así como el túnel de LEP. Es un acelerador diseñado para funcionar principalmente con colisiones de haces de protones de energías de alrededor de 7 TeV, pudiendo en ciertas etapas de su utilización actuar como colisionador de iones pesados (Pb).

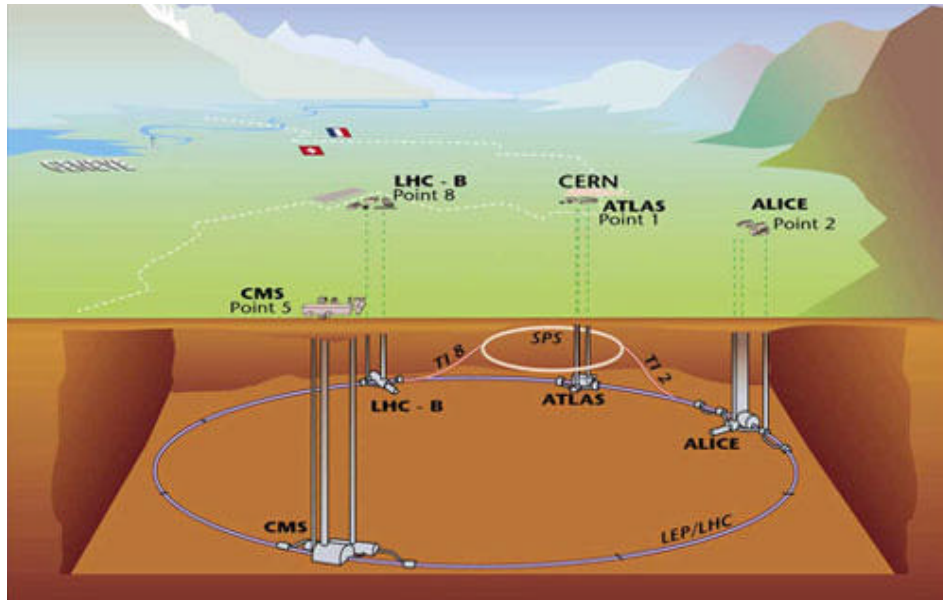


Figura 3.8.- Vista general de los experimentos asociados a LHC

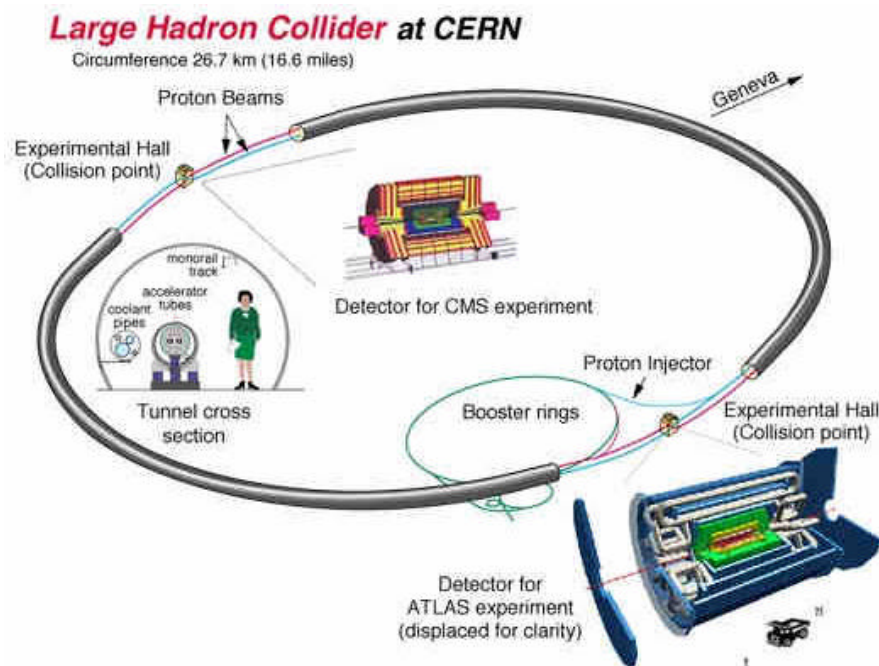


Figura 3.9.- Experimentos ATLAS y CMS en el LHC

El detector CMS está formado por diferentes subdetectores que rodean el tubo de vacío por donde circulan los haces de protones [8]. El primer subdetector es el tracker, dispositivo en el que dejan su huella las partículas cargadas que lo atraviesan. Envolviendo al tracker se encuentra el calorímetro electromagnético (ECAL) que mide la energía de los electrones y fotones que llegan a él. El calorímetro hadrónico (HCAL) rodea al ECAL y su objetivo es absorber los hadrones que lo alcanzan y medir su energía.

A continuación, la bobina del solenoide envuelve a los calorímetros, generando un campo magnético en el interior de 4T, que provoca la curvatura de las partículas cargadas a partir de la cual se mide su momento. En el exterior del solenoide se encuentra el detector central de muones, formado por 250 cámaras de deriva, intercaladas en el entrehierro del imán por el que circula el campo magnético de retorno (figura 3.3).

REFERENCIAS

- [1] <http://palmera.pntic.mec.es/~fbarrada/profesores/prof61.html>
- [2] Búsqueda de Leptones Excitados y Estudio del Proceso $e^+ e^- \rightarrow ZZ$ en LEP. M.A. Falagan. Tesis Doctoral 2.000.
- [3] Cámaras de planos paralelos y su aplicación en calorimetría a bajo ángulo en experimentos en el LHC. M. C. Fouz. Tesis Doctoral 1.997.
- [4] Estudio del Proceso $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma$ (?) a las energías de LEP. J. Rodríguez. Tesis Doctoral 1.997.
- [5] Física Nuclear. G. Velarde. UPM. 1.984.
- [6] Diseño y fabricación de cámaras de deriva para el experimento ICARUS. M. Daniel. Anteproyecto de Tesis Doctoral. UC3M. 2.004.
- [7] Estudio y Análisis de los Parámetros de Cámaras de Deriva. L. Martínez. Tesis Doctoral. 1.998.
- [8] The Compact Muon Solenoid. Technical Proposal. CERN/LHC 94-38. LHCC/P1.1994.

CAPÍTULO 4

FABRICACIÓN ARTESANAL DE CÁMARAS DE DERIVA

4.1.- FABRICACIÓN DE CÁMARAS DE DERIVA PARA EL DETECTOR L3

En el transcurso del año 1983, la División de Física de Partículas del CIEMAT manifestó a la Colaboración L3 [1] su interés en contribuir a la construcción del detector de muones con la fabricación de las cámaras de deriva, también llamadas cámaras Z.

L3 fue una colaboración internacional compuesta por 33 laboratorios de 11 países, de América, Asia y Europa, cuyo principal objetivo era construir un gran espectrómetro, con el que realizar uno o varios experimentos utilizando el nuevo acelerador LEP, entonces en construcción [2].

LEP (Large Electron and Positron Collider) era un gran acelerador circular de electrones y positrones en el que se alcanzaron energías del orden de 100 GeV. Estaba constituido por un anillo subterráneo de 26.7 Km. de perímetro, con 8 tramos rectos de 492 m de longitud donde se situaban las áreas experimentales (P1 a P8) y los sistemas de aceleración (figura 4.1).

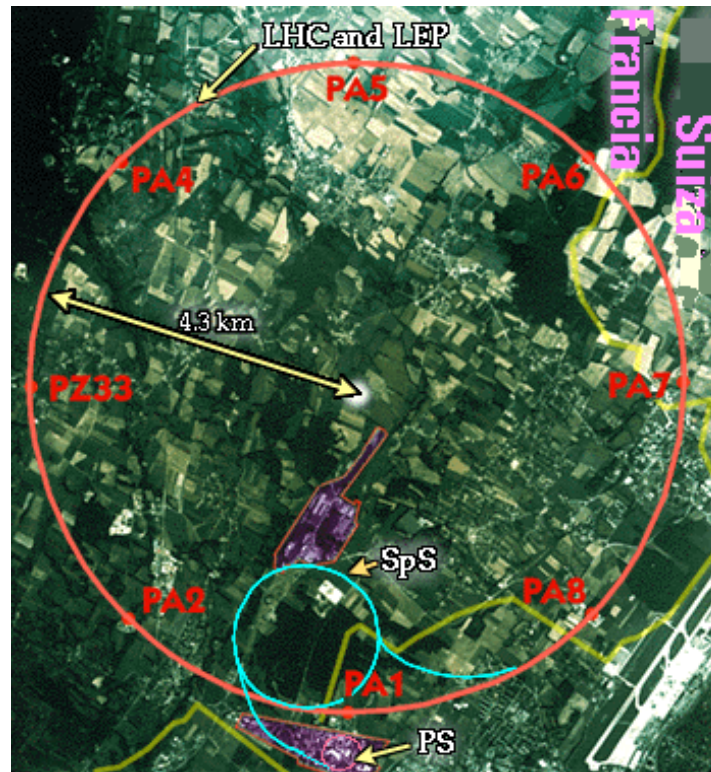


Figura 4.1.- Ubicación del acelerador LEP

En las áreas experimentales pares se encontraban los cuatro detectores de LEP, el espectrómetro L3 estaba situado en P2 (Figura 4.2).

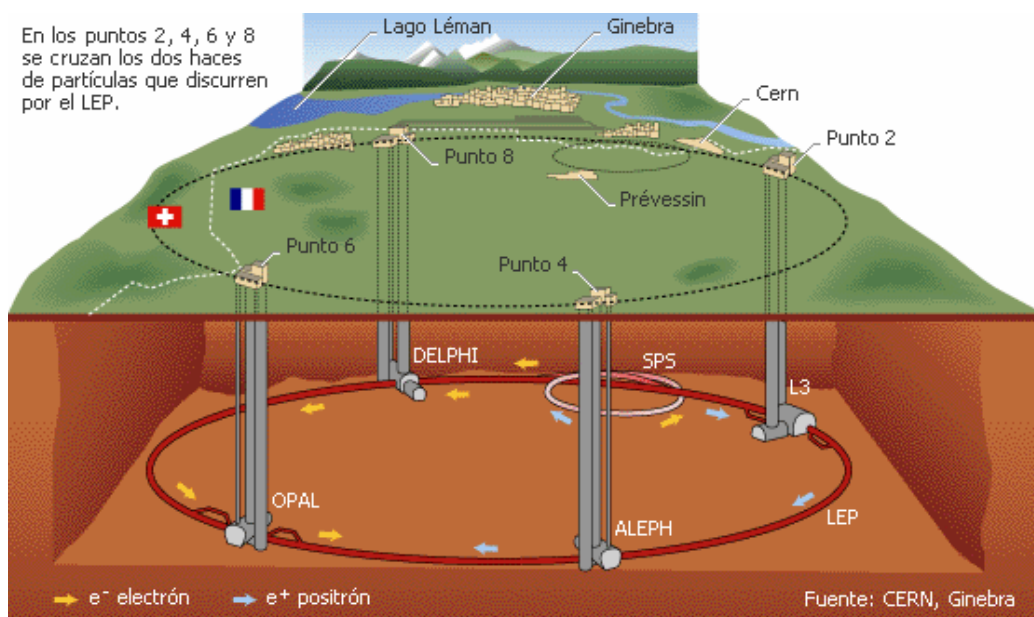


Figura 4.2.- Detectores de LEP

Este espectrómetro estaba formado, esencialmente, por cuatro detectores y un gran imán solenoidal, que proporcionaba un campo magnético de 0.5 T, el cual los rodeaba [3]. Los detectores eran: un detector de vértice, un calorímetro electromagnético, un calorímetro hadrónico y un detector de muones (figura 4.3).

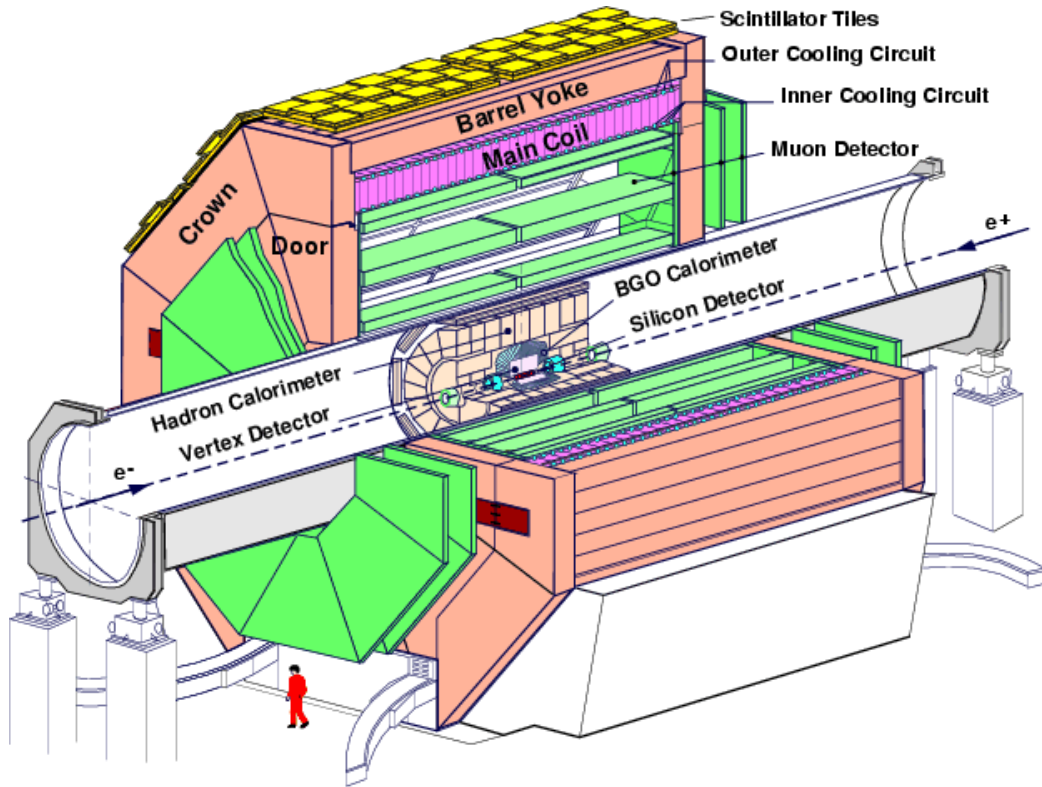


Figura 4.3.- Espectrómetro de muones de L3

En la construcción del detector de muones participaron cuatro laboratorios: MIT (USA), NIKHEF (Holanda), Universidad de Nápoles (Italia) y CIEMAT.

Mecánicamente estaba constituido por una estructura soporte formada por 16 octantes (figura 4.4) distribuidos en dos ruedas (Figura 4.5), un tubo de torsión de acero y un conjunto de cámaras de deriva distribuidas en tres capas. El detector de L3 contenía dos tipos de cámaras: las destinadas a medir el momento de los muones a partir de la medida de la coordenada x del paso de cada muón por cada una de ellas, llamadas cámaras P; y las destinadas a medir la coordenada z , llamadas cámaras Z.

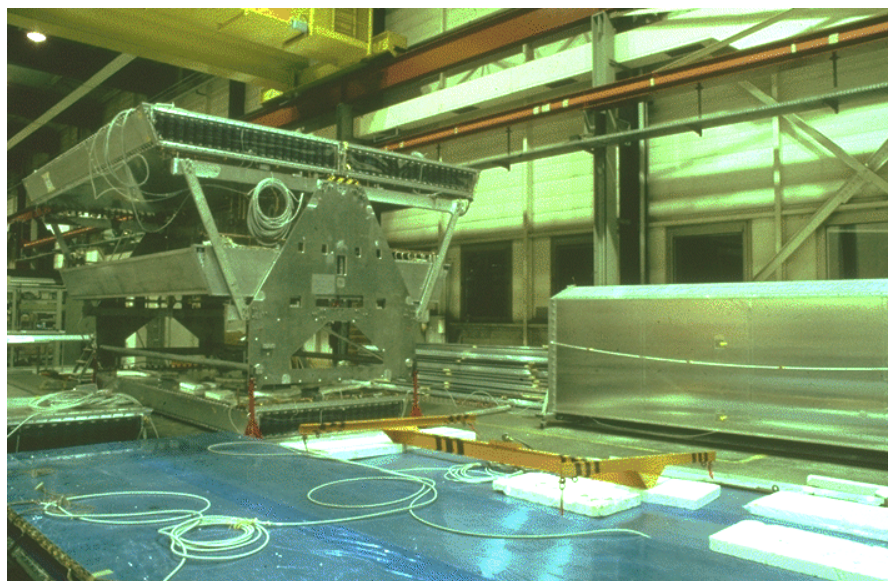


Figura 4.4.- Detalle de un octante

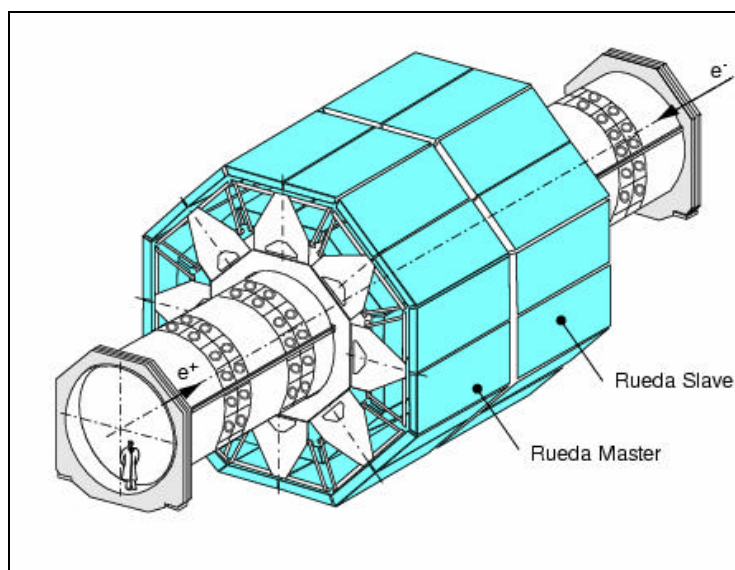


Figura 4.5.- Ruedas del detector L3

El número total de cámaras Z integradas en el detector L3 era de 96, teniendo cada una de ellas unas dimensiones aproximadas de 2,5 x 5,5 x 0.06 m. La construcción y verificación de estas cámaras fue responsabilidad exclusiva del CIEMAT.

Durante el año 1984 se llevaron a cabo, en los talleres generales del CIEMAT, diversos prototipos de cámaras Z, poniendo a prueba distintos métodos de fabricación y ultimando el diseño de las mismas. En enero de 1985, la Dirección General del CIEMAT aprobó, con máxima prioridad, el proyecto de construcción de las 96 cámaras Z. Dicho proyecto constaba de dos partes: En una primera fase se contemplaba el acondicionamiento de una nave de montaje (edificio 41), así como la construcción de diversos útiles y equipos necesarios para su fabricación en serie. La segunda fase consistía en la fabricación propiamente dicha.

En Junio de 1985, después de seis meses de intenso trabajo, estuvo todo dispuesto para comenzar la fabricación. En julio se montó la primera cámara de la serie. En marzo de 1987, se estaba montando la cámara número 54 y el ritmo de producción alcanzado fue de una cámara fabricada cada 5 días.

La fabricación finalizó a mediados de 1988, siendo instaladas las cámaras Z en el espectrómetro, gradualmente desde 1986; y habiendo estado operativas hasta el año 2000, fecha de clausura de LEP.

4.2.- CÁMARAS Z

4.2.1.- DESCRIPCIÓN

Las cámaras Z son cámaras del tipo de deriva. Miden la coordenada Z a lo largo de la dirección del haz en ocho puntos, permitiendo reconstruir la trayectoria de los muones originados en las interacciones electrón-positrón. El hilo sensor de cada celda estaba conectado a un potencial positivo de 2200 V. El gas de llenado de la cámara era P9, gas comercial compuesto por un 91.5 % de argón y un 8.5 % de metano.

Las cámaras Z destinadas a operar en el detector L3 estaban formadas por un total de 120 celdas de deriva de 91 mm de anchura y cada una con un hilo sensor, distribuidas en dos planos, desplazado uno respecto a otro media celda, siendo el número total de hilos sensores de todas las cámaras de 11.184. Cada hilo sensor estaba posicionado dentro del

detector con una precisión de 0.2 mm. La precisión con que se pretendía medir la coordenada Z del paso de muones era del orden de 0.5 mm. Cada hilo sensor estaba rodeado por unos electrodos, para conformar el campo eléctrico en el que derivan los electrones. Estos electrodos estaban constituidos por unas vigas de aluminio en I, conectadas a un potencial negativo de 2500 V.

4.2.2.- ESTRUCTURA MECÁNICA

Una cámara Z constaba esencialmente de un marco de aluminio, dentro del cual se formaban un conjunto de celdas transversales de 91 mm x 60 mm. Dentro de cada celda, y en su centro, se encontraba un hilo sensor de molibdeno-oro de 50 micras de diámetro. El hilo de molibdeno no se oxida y es muy resistente; además su producción es industrial. No obstante, su superficie es anfractuosa y es necesario recubrirla de oro para uniformizarla y aumentar su conductividad.

Las celdas estaban formadas por vigas I, aisladas con bandas de fibra de vidrio sobre las alas y sujetas al marco mediante soportes especiales de plástico. Los hilos sensores también iban sujetos al marco mediante piezas del mismo material. El conjunto del marco, vigas e hilos iba cerrado por ambas caras mediante planchas de aluminio. Además, una plancha de aluminio dividía el volumen de la cámara en dos partes iguales, separando las celdas en dos planos (figura 4.6).

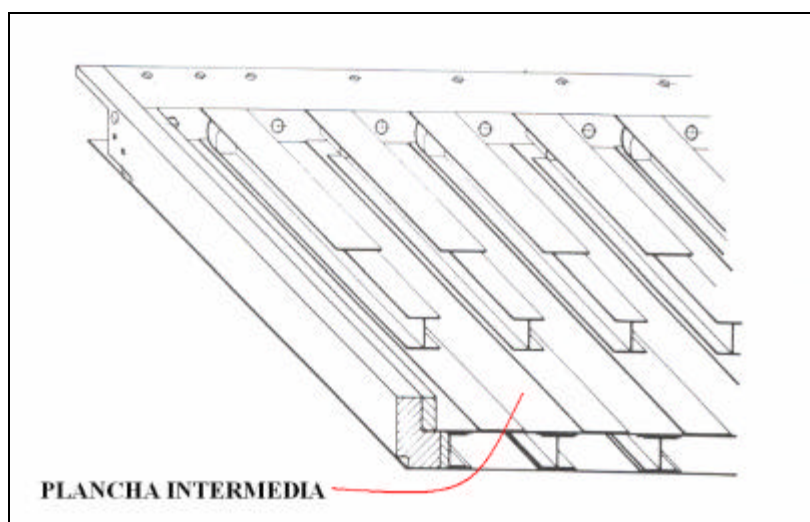


Figura 4.6 - Esquema del interior de una cámara Z

4.2.3.- TIPOS

Se fabricaron seis tipos diferentes de cámaras Z, que se diferenciaban tanto por su forma y tamaño como por su situación en el detector. Su designación estaba relacionada con su posición con respecto al punto de interacción (PI). Las dos más cercanas al PI eran del tipo II e IM; situadas entre ellas (Figura 4.7) estaba la cámara P, llamada MI; las dos más alejadas del PI eran del tipo OM y OO, estando entre ellas la cámara P, llamada MO.

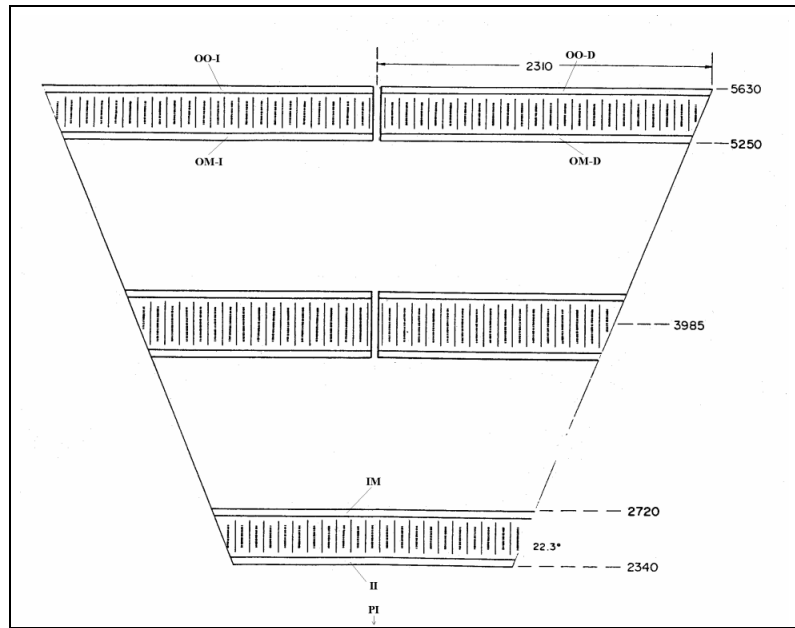


Figura 4.7.- Designación de las cámaras Z

El número de cámaras de cada tipo se indica en la tabla 4.1.

Tipo	Unidades
II	16
IM	16
OM-I	16
OM-D	16
OO-I	16
OO-D	16

Tabla 4.1.- Número de cámaras por tipos

4.2.4.- FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS

Durante el año 1984 se construyeron, en los Talleres Generales del CIEMAT, diversos prototipos de cámaras Z, ensayando distintos métodos de fabricación y ultimando el diseño de las mismas. Así, en la primera mitad de ese año se fabricaron cuatro prototipos de cámaras Z, uno de cada tipo de los especificados en la tabla anterior, que fueron probados y posteriormente enviados al MIT para su integración con las cámaras P allí construidas.

La experiencia adquirida permitió localizar los aspectos más críticos de las operaciones necesarias para el montaje de las cámaras, destacando las dificultades inherentes a las operaciones de pegado y a la consecución de una perfecta estanqueidad de las mismas. Durante los últimos meses de 1984 se construyeron dos nuevos prototipos, uno del tipo OM y otro del tipo OO, consiguiéndose solventar los problemas anteriormente mencionados.

4.3.- IMPLANTACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN

4.3.1.- ESTUDIO DEL PROCESO

Una vez superada la fase de construcción de prototipos, técnicamente se estaba en condiciones de iniciar el proceso de fabricación en serie. Entre los aspectos fundamentales a considerar estaba el calendario de ejecución. Las 96 cámaras deberían estar operativas a finales de 1987, lo cual implicaba un ritmo de producción de aproximadamente una cámara por semana.

Con objeto de no sobrecargar a los Talleres Generales del CIEMAT, se consideró la conveniencia de contratar todas las tareas posibles a industrias y talleres externos. Sin embargo, era evidente que actividades como el ensamblaje y las pruebas de funcionamiento y puesta a punto deberían realizarse íntegramente en el CIEMAT.

Con el fin de estudiar los problemas técnicos de la fase de producción y programar las acciones necesarias para llevarla a cabo, se formó a mediados de noviembre de 1984 un comité de expertos integrado por técnicos del Taller General, del Taller de Investigación Básica, de la División de Ingeniería, de SENER Ingeniería y Sistemas y de la División de Física de Partículas.

A continuación se enumeran los problemas cuya solución fue considerada como imprescindible para poder abordar la fase de producción:

1. Mantener la temperatura constante y el espacio razonablemente libre de polvo, en la nave de montaje (edificio 41).
2. Planitud óptima de la mesa de pegado, necesaria para ejercer presión de forma uniforme y asegurar una buena adhesión. Se consideró que las tolerancias debían ser de 100 micras en 100 mm.
3. Procedimiento adecuado para el manejo y limpieza de las grandes planchas de aluminio.
4. Realizar el corte de la plancha central de aluminio con un error admisible de 1 mm en ambas direcciones.
5. Disminuir el tiempo empleado en el ensamblaje del marco para asegurar la perpendicularidad entre sus lados. Evitar el pandeo del perfil de mayor longitud.
6. Controlar la flexión de la mesa de volteo para evitar deformaciones en la cámara.
7. Diseñar separadores ("almohadillas") más precisos, para obtener las tolerancias verticales adecuadas de los distintos componentes.
8. Optimizar la dosificación del adhesivo (eccobond). Limpiar el exceso de adhesivo supone mucho tiempo y esfuerzo.
9. Solventar las dificultades de colocación de bloques láser. El diseño debía ser tal que incluyera estos bloques como parte integral de las vigas I. Las tolerancias de centrado del taladro debían ser menores de 0.5 mm.
10. Los planos finales para construcción, incluyendo todas las modificaciones aprobadas, tenían que estar en el más breve plazo posible.
11. Comprobar si el sistema de colocación de hilos anódicos era mejorable.
12. La tolerancia vertical del conjunto: espesores de pegado + láminas de plástico + perfiles I + plancha intermedia, debían coincidir con las alturas del centrador, y su vástago con el centro del taladro en el perfil perimetral.

13. Resolver los problemas relativos a la extrusión sin mecanizado superficial posterior de los perfiles del marco. Los taladros tenían tolerancias muy estrictas.
14. Continuar con las pruebas para determinar el envejecimiento del pegado.
15. Optimización de los movimientos inherentes al montaje en el edificio 41 y del espacio disponible.

Tras un análisis de cada uno de ellos, se llegó a la conclusión de que existían, desde el punto de vista técnico, soluciones para todos ellos. Cómo se materializaron es lo que se describe a continuación. La planificación, que aquí se expone de forma resumida, fue elaborada por el comité de expertos citado con anterioridad.

4.3.2.- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En el proceso de fabricación de las cámaras Z, se determinaron las actividades reflejadas en la tabla 4.2, al frente de cada una de las cuales debía haber un responsable:

ACTIVIDADES	TAREAS
Suministros	Materias primas. Mecanizado Exterior. Extrusiones. Verificación
Planchas de aluminio	Corte. Perforación. Lijado. Limpieza. Verificación dimensional
Vigas I	Corte a medida. Tratamiento superficial. Fibra de vidrio. Pegado con LOCTITE. Verificación
Montaje	Precisión dimensional. Pegado con eccobond. Cableado interno. Verificaciones
Repaso y cableado externo	Taladrado y limpieza de sobrantes. Pequeños componentes. Cables, conectores
Tests finales	Estanqueidad. Pruebas eléctricas. Fuente radiactiva. Rayos cósmicos. Reparaciones
Transporte	Dentro de CIEMAT: Embalaje. Transporte a Ginebra

Tabla 4.2.- Actividades del proceso de fabricación

Cada actividad se tendría que desarrollar independientemente, aunque sería necesaria una coordinación de todas ellas que asegurase el funcionamiento de todo el proceso. Dado que el tiempo estimado para la fase de ensamblaje fue de dos semanas por cámara, sería necesaria la implantación de dos líneas de montaje funcionando en paralelo.

4.3.3.- DISPOSICIÓN EN PLANTA

El estudio de las necesidades de espacio por áreas, cada una con sus características específicas, se indican en la tabla 4.3.

ÁREA	CARACTERÍSTICAS
Zona de montaje	Deberá ser una zona limpia. Necesidad de grúa de 1000 kg. Temperatura controlada. Dimensiones: 15 x 15 m ² . Edificio 41
Zona de repaso y cableado externo	Zona semilimpia. Necesidad de grúa de 1000 kg, distinta de la anterior. Temperatura controlada. Dimensiones: 10x15 m ² . Edificio 41
Zona de pegado vigas I - fibra de vidrio	Requiere extractor para ventilación. Dimensiones: 3x4 m ² . Edificio 2
Zona de chapa	Sección de chapa del Taller General
Zona de tests y reparaciones	Acceso a red. Instalación eléctrica libre de parásitos. Grúa de 1000 kg. Posibilidad de carga de contenedor a camión. Deseable la nave del Ed. 2.

Tabla 4.3.- Necesidades de espacio

La planta de fabricación debería ser una zona limpia y con temperatura controlada, lo que requería un acondicionamiento del edificio 41. Esta era una tarea previa a la fase de producción. Este acondicionamiento significaba:

- Vaciar la nave y limpiar suelo, techo y paredes
- Pintar
- Implementar una instalación de aire acondicionado
- Mejorar el sistema de calefacción
- Inyectar espuma para sellado de zona limpia
- Instalar mampara de separación de zonas y ventilador para crear sobrepresión
- Instalar una grúa

Además, y también previo a la fase de producción, serían necesarios nuevos útiles y herramientas, consecuencia del nuevo enfoque resultante del análisis de los problemas enumerados anteriormente y del hecho de necesitar una doble línea de montaje. Más específicamente se necesitaba:

- Una mesa fija de pegado: Sería necesaria la mejora de la mesa existente y la instalación de una superficie plana sobre ella de un vidrio especial.
- Un sistema de vacío para presión: Se necesitaría una turbina, plástico especial y una estructura de hierro.
- Un útil para manejo de planchas y una pulidora mecánica.
- Una cortadora de planchas, una plantilla de aluminio, un bastidor y varios tableros de madera.
- Dos mesas de volteo de aluminio.
- Separadores para la instalación de la plancha intermedia.
- Tres mesas grandes de madera, una de ellas con ruedas y otra que permita el volteo.
- Dos mesas adicionales para almacenamiento de planchas de aluminio y vigas I.
- Una máquina para cortar vigas.
- Una plataforma para el transporte interno.
- Una máquina mezcladora de adhesivo (eccobond).

4.3.4.- PRINCIPALES COMPONENTES

Aparte del material necesario para los útiles y dispositivos mencionados en el apartado anterior, que se fabricarían en el CIEMAT, había que tener en consideración los materiales necesarios para la construcción de cámaras, y las operaciones que había que realizar obligatoriamente antes de la fabricación propiamente dicha. Algunas de estas

operaciones requerían una preparación previa. Todas ellas se realizaron íntegramente en el CIEMAT y fueron las siguientes:

4.3.4.1.- PLANCHAS DE ALUMINIO

Las planchas de aluminio, de 1 mm de espesor, debían ser cortadas a la medida para cada tipo de cámara. Esta operación se llevaba a cabo en la sección de chapa de los Talleres Generales. Una idea de su dificultad, puede darla el hecho de que el corte debía hacerse con una precisión de 1 mm siendo la plancha a cortar de 3 x 6 m. El número total de planchas a cortar era de 288. Una vez cortadas, se lijaban y limpiaban con propanol para garantizar una perfecta adherencia del adhesivo.

4.3.4.2.- VIGAS I

Las vigas I, tras su recepción, sufrían varias operaciones mecánicas y tratamientos químicos. En primer lugar, era necesario cortarlas a la longitud adecuada a cada tipo de cámara. A continuación, debían redondearse las puntas y eliminar rebabas a fin evitar descargas de alta tensión. Estas dos operaciones se realizaban en los Talleres Generales.

Una vez finalizadas las operaciones mecánicas, las vigas I se transportaban a la zona de decapado de la División de Metalurgia, donde eran introducidas en un baño de sosa para disolver la capa de óxido superficial, presente de forma natural en el aluminio. Una vez decapadas, se introducían en un baño de acetona para eliminar los restos de sosa, así como para prevenir una posible oxidación del aluminio al estar en contacto con el aire. Las vigas decapadas permanecían en el baño de acetona hasta colocarles el aislamiento.

Para aislar eléctricamente las vigas I, se les adherían sobre las alas unas bandas de fibra de vidrio de 1 mm de espesor. Una vez llegado el momento de realizar esta operación, se trasladaban del baño de acetona de la zona de decapado de Metalurgia al edificio 2, donde se realizaba dicho pegado por personal de la División de Física de Partículas.

Después de pegar las fibras de vidrio, era necesario someter a las vigas a una prueba de alta tensión, para comprobar que el aislante se comportaba adecuadamente y que el nivel de corrientes de fugas estaba dentro de los límites aceptables. Las vigas I que pasaban

satisfactoriamente las pruebas de alta tensión se introducían en fundas de plástico y se trasladaban a la nave de montaje.

4.3.4.3.- MARCOS

Los perfiles para formar los marcos se recepcionaban en el CIEMAT. Los marcos estaban constituidos por dos perfiles laterales y dos frontales. Estos perfiles se limpiaban, en primer lugar, con agua caliente y detergente para eliminar los restos de grasa, taladrina o virutas producidas durante el proceso de mecanizado.

Inmediatamente después, se lijaban las superficies de los mismos en las que iban pegadas las planchas de aluminio, para aumentar la adherencia con el adhesivo. Estas operaciones las realizaban, en los Talleres Generales, operarios del equipo de fabricación de cámaras.

4.3.4.4.- VIGAS ESPECIALES Y PASOS LÁSER

Para permitir el paso de los rayos láser que se utilizarían en la calibración de las cámaras P, era necesario insertar en las cámaras Z los llamados pasos láser. Cada una de estas piezas de plástico iba acoplada en una viga I, que la soportaba y posicionaba. El montaje de las vigas especiales era realizado por los operarios del equipo de fabricación.

4.3.4.5.- OTROS COMPONENTES

- Hilo anódico de Molibdeno-oro, de 50 micras de diámetro.
- Piezas de plástico Delrin y teflón para sujeción de vigas e hilos.
- Componentes electrónicos, piecerío, adhesivos [4] y otros.

4.3.5.- FABRICACIÓN: ETAPAS

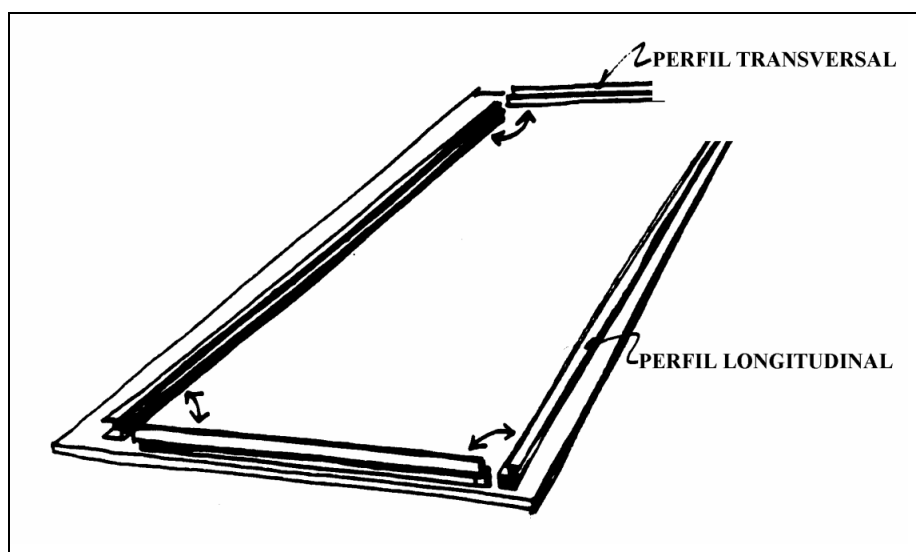
A continuación se describen esquemáticamente las operaciones a realizar, todas ellas manuales (figura 4.8), durante el proceso de fabricación [5]:



Figura 4.8.- Fabricación de cámaras Z en el CIEMAT

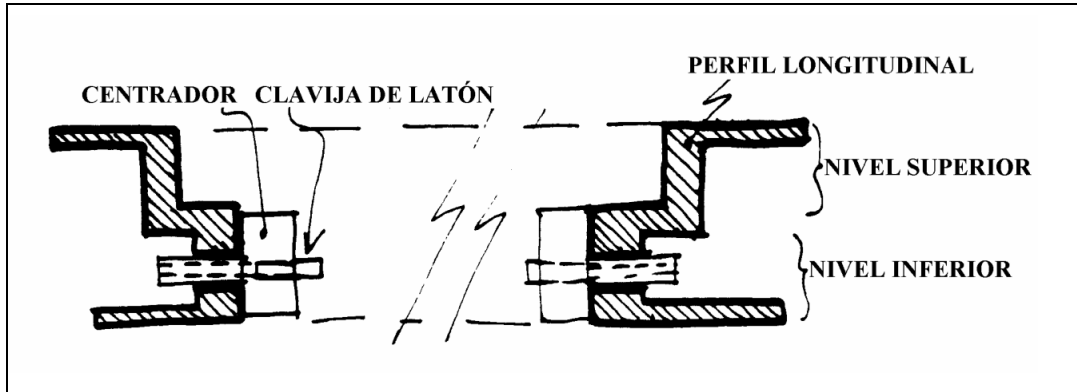
1.- Formar el marco de aluminio.

El marco se formaba sobre una de las dos mesas giratorias especialmente previstas para esta operación. Sus perfiles longitudinales y transversales debían estar perfectamente alineados, con un error inferior a $250\text{ }\mu\text{m}$ y perpendiculares.

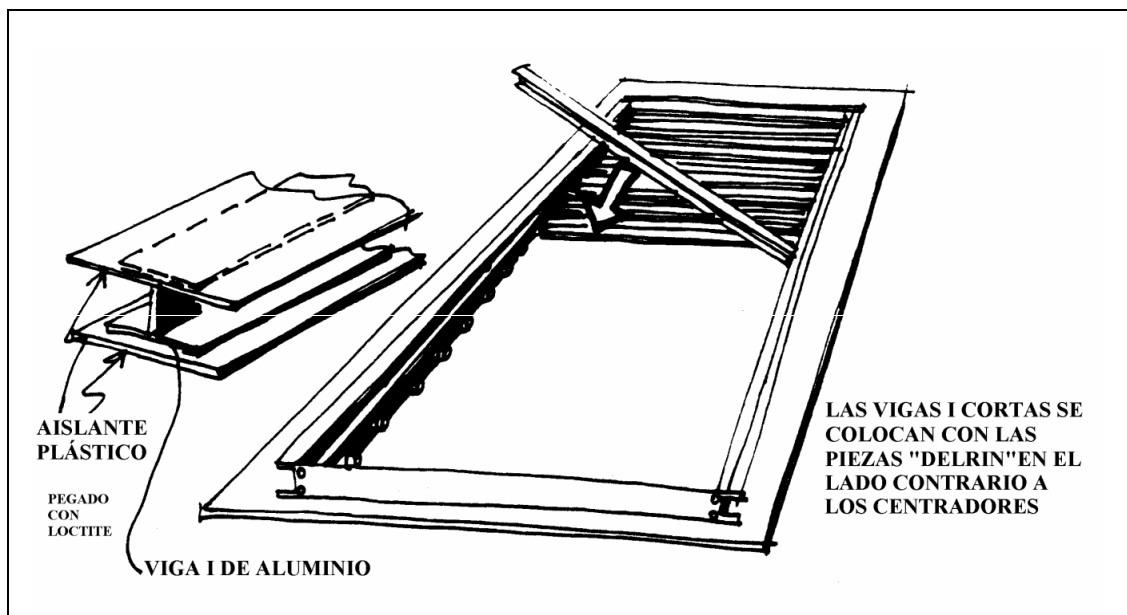


2.- Colocar centradores del nivel inferior y clavija de latón.

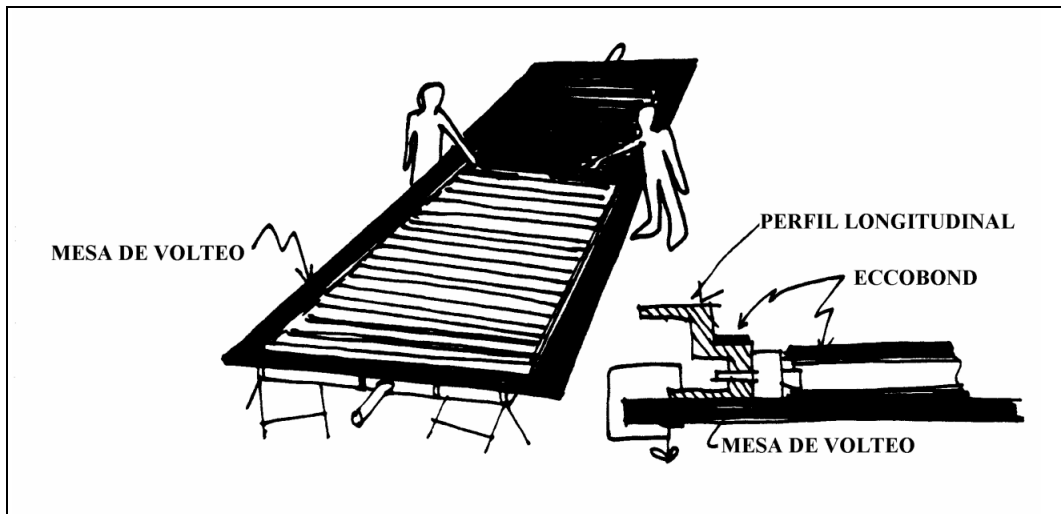
Las piezas de plástico se introducían en los taladros previstos al efecto en el marco de aluminio, previo enfriamiento de las mismas en nitrógeno líquido.



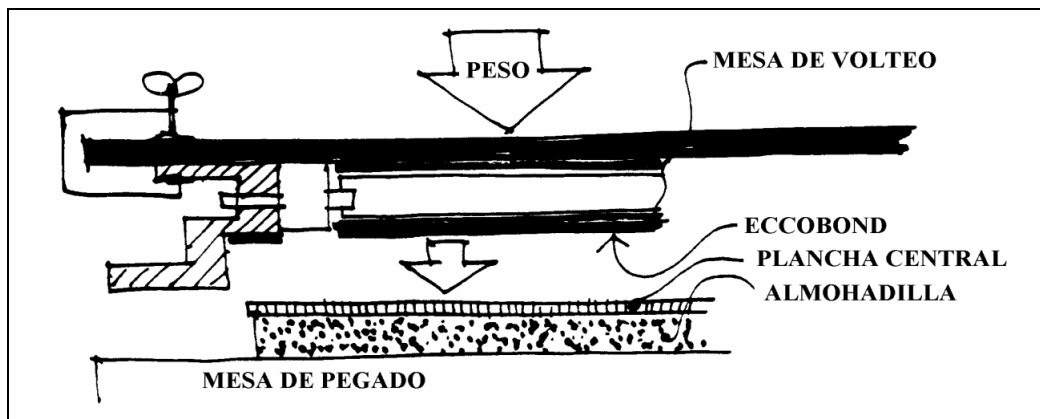
3.- Colocar vigas I cortas en nivel inferior.



4.- Dispensar adhesivo en vigas I y escalón de los perfiles del marco:

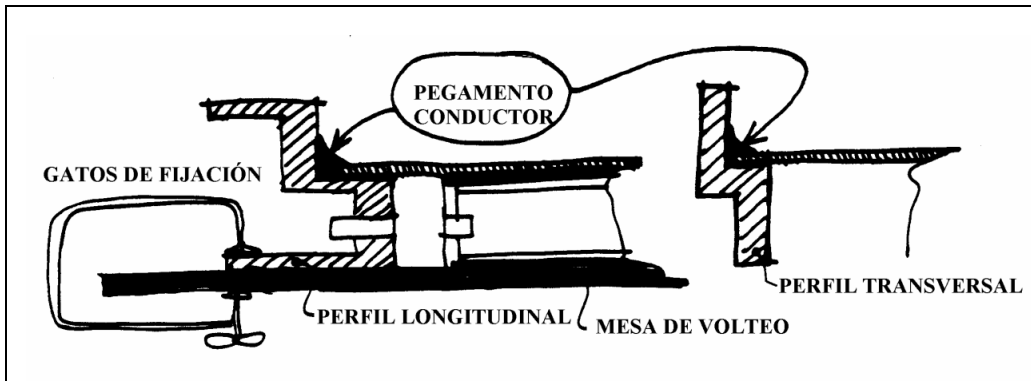


- Voltar el conjunto sobre la mesa de pegado, con almohadillas dispuestas en su superficie sobre las que está la plancha de aluminio central que previamente se había limpiado.

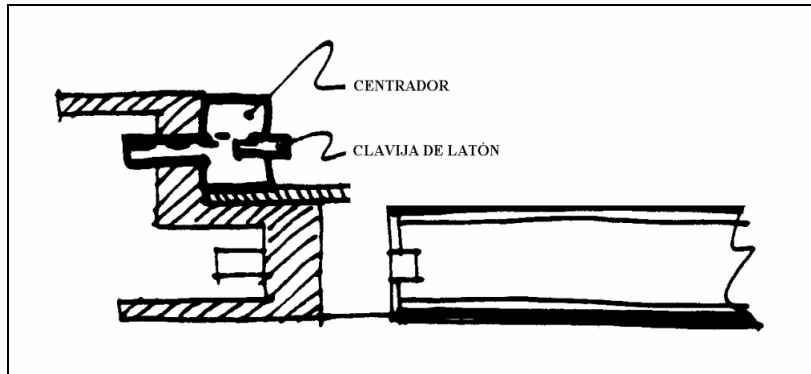


- Colocar peso en la parte posterior de la mesa de volteo, colocar plástico sobre el conjunto marco-plancha-peso, y hacer vacío. Dejando curar el adhesivo.
- Voltar la mesa, dejando visible la semicámara superior.

5.- Retirar sobrantes de adhesivo (eccobond) y aplicar pegamento conductor.

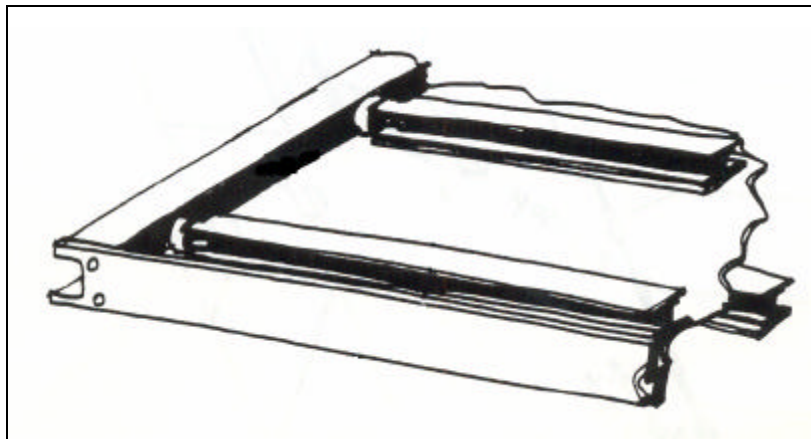


6.- Colocar centradores en el nivel superior (nitrógeno líquido).

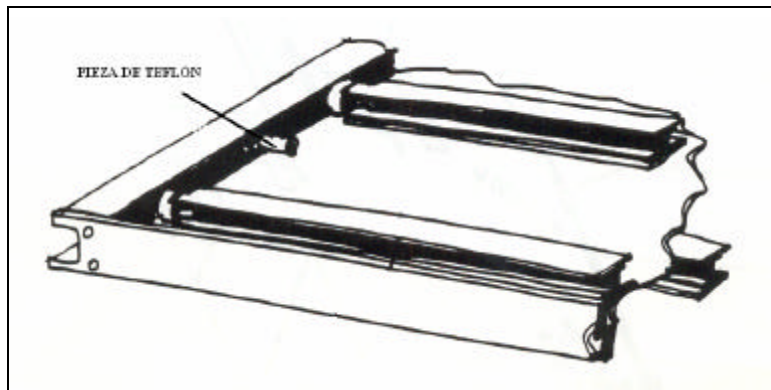


7.- Colocar vigas I largas con adhesivo con clavijas delrin.

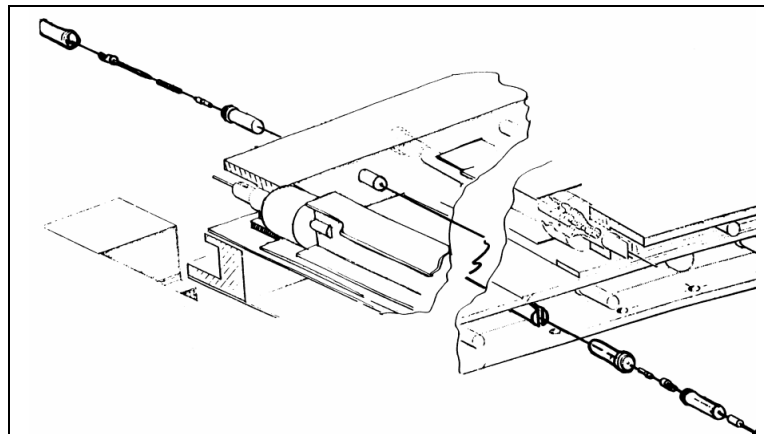
Se colocaban de 10 en 10 unidades, poniendo pesos sobre las almohadillas (igual que en el punto 3 pero en el nivel superior).



8.- Colocar piezas de teflón en el nivel superior.

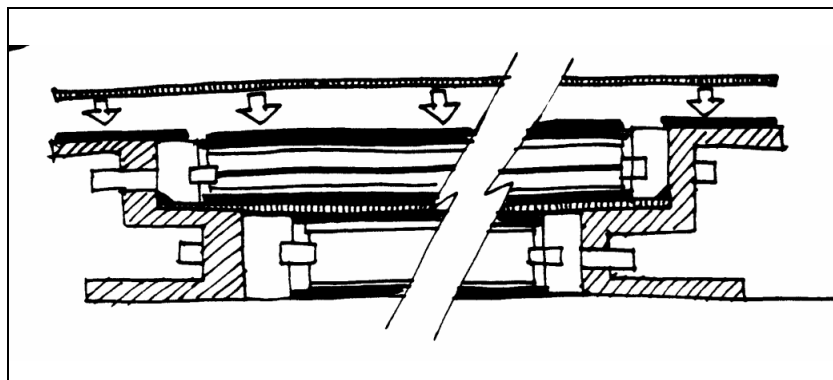


9.- Colocar hilos sensores largos soldados con las agujas de sujeción del nivel superior.



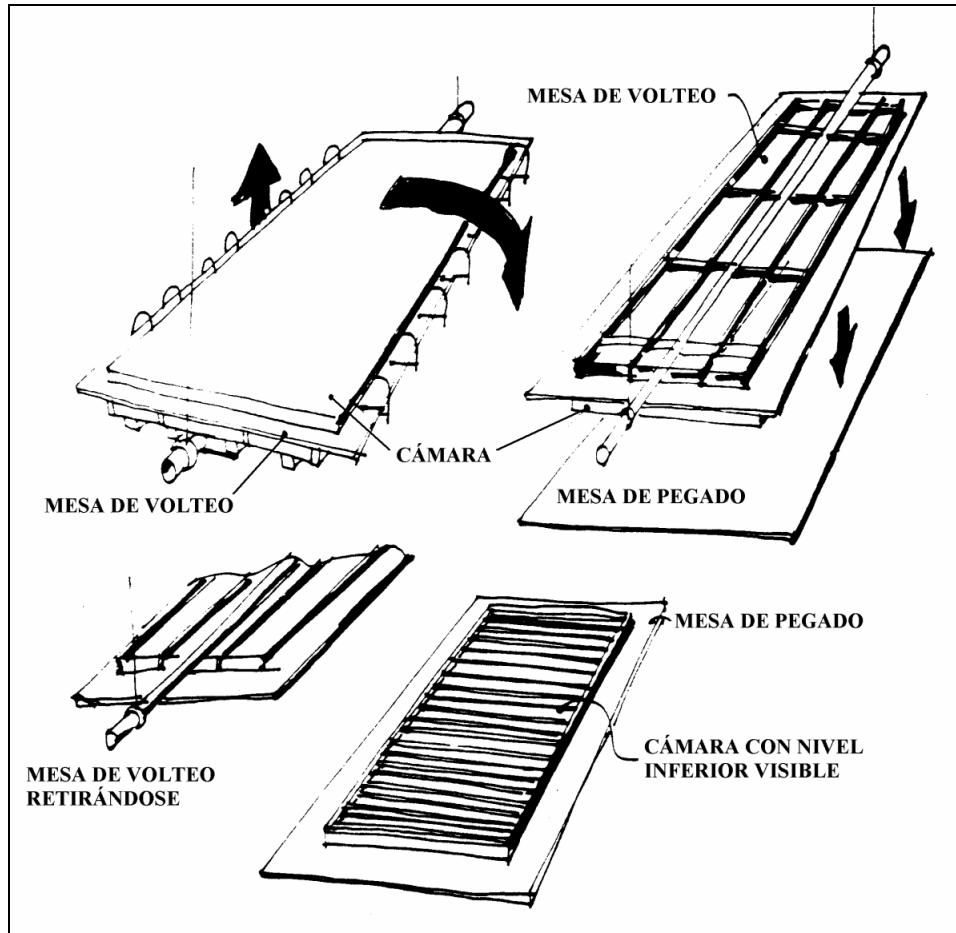
10.- Dispensar adhesivo en cara superior del marco y vigas I y pegar plancha superior

Se hacía vacío tal y como se había hecho para la plancha intermedia.



11.- Voltear la cámara de modo que la parte inferior quede visible.

Se colocaba peso en la parte inferior de la mesa de volteo, se dejaba curar el adhesivo y se separaba la mesa.



12.- Poner piezas de teflón en plano inferior (como punto 8).

13.- Colocar los hilos sensores cortos del plano inferior. (como punto 9)

14.- Dispensar adhesivo sobre el marco y vigas I cortas, pegar plancha de cierre inferior.

Se volteaba, se ponía peso, se hacía vacío, y se dejar curar el adhesivo (punto 10).

15.- Eliminar sobrantes de adhesivo de planchas inferior y superior.

16.- Realizar taladros de fijación

Se realizaban los taladros que permitirían integrar las cámaras Z con las cámaras P, así como los necesarios para la manipulación y anclaje de amplificadores.

17.- Limpiar taladros láser y de alineación

Los agujeros por los que pasarían los rayos láser debían quedar perfectamente exentos de restos de adhesivo.

18.- Colocar plástico adhesivo protector

19.- Cableado exterior

En esta operación se colocaban los tapones de los hilos, con y sin componentes, y se hacían las conexiones necesarias para poder polarizar convenientemente los electrodos y al mismo tiempo poder extraer las señales provenientes de los hilos sensores.

4.4.- CONTROL DE CALIDAD

Una vez finalizada la fabricación de cada cámara, era necesario someterla a una serie de pruebas para determinar la calidad del producto terminado. En el caso de que el resultado de las pruebas fuera negativo, debía procederse a efectuar las modificaciones y reparaciones necesarias hasta que la cámara pudiera ser aceptada.

Para llevar a efecto este control de calidad, las cámaras se trasladaban al edificio 2 (figura 4.9). El personal encargado de estas tareas pertenecía a la División de Física de Partículas.

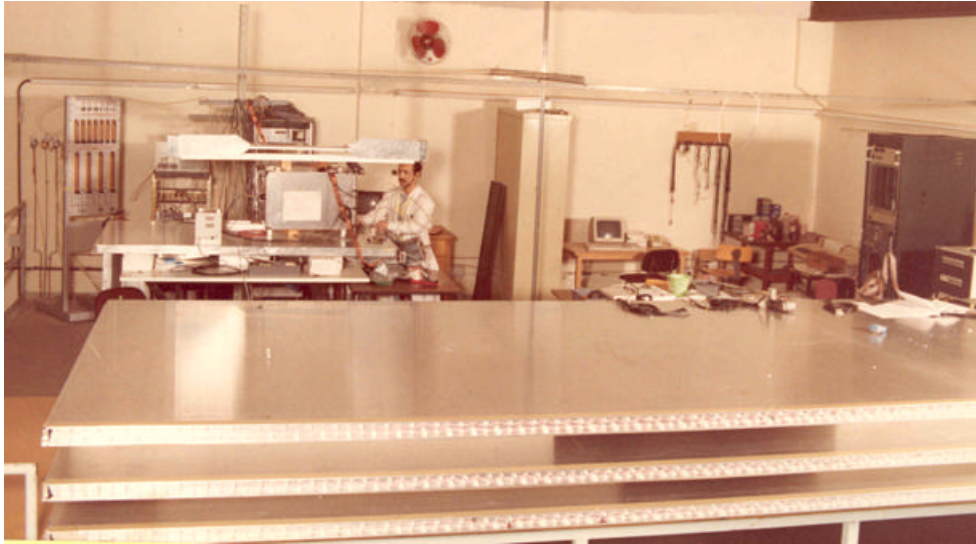


Figura 4.9.- Zona de pruebas de las cámaras Z en el CIEMAT

Las pruebas a las que se sometían las cámaras eran:

- Estanqueidad

Cada cámara debía ser perfectamente estanca para que no hubiera fugas del gas interior, ni pudiera entrar aire en la misma.

- Fugas de alta tensión

El conjunto de vigas e hilos, conectados a sus respectivas altas tensiones debía en todo momento, mantener un nivel de corrientes de fuga razonablemente bajo. Sería inadmisibles la producción de chispas dentro de la cámara. Antes de cerrar con la correspondiente plancha de aluminio cada semicámara, era necesario verificar que no había fugas de alta tensión en las vigas I.

- Recuento de rayos cósmicos

Cada uno de los hilos sensores debía proporcionar un número de cuentas por minuto, correspondiente al número de rayos cósmicos que atraviesan cada celda. En este nivel de pruebas era necesario reemplazar aquellos hilos que no daban cuentas o, por el contrario, aquellos que daban demasiadas, debido a pequeñas descargas por efecto corona, suciedad, etc.

4.5.- PRODUCCIÓN

Se comenzó la producción en julio de 1985. En marzo de 1987, se estaba fabricando la cámara número 54 y el ritmo de producción alcanzado fue de una cámara fabricada por semana con dos líneas de montaje en paralelo. El personal necesario para construir las 96 cámaras en el período previsto fueron 20 operarios, de los cuales 10 intervenían a tiempo completo en la fabricación mecánica. Todas las tareas de fabricación se realizaban manualmente.

La fabricación finalizó a mediados de 1988 incluyendo una cámara de repuesto de cada tipo, siendo instaladas en el espectrómetro L3 gradualmente desde 1986 a 1988 (figura 4.10), habiendo estado operativas hasta el año 2000, fecha de clausura de LEP.

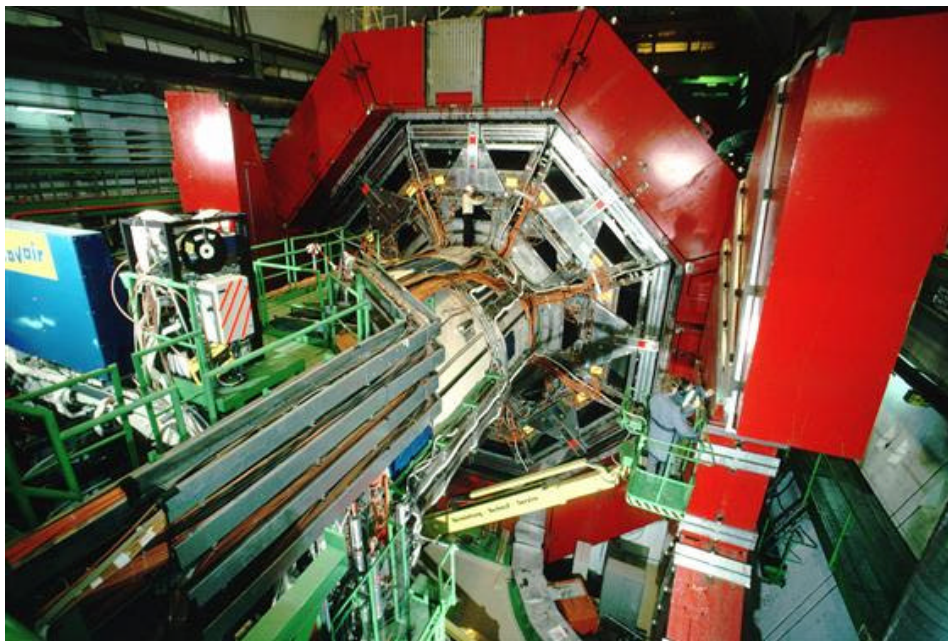


Figura 4.10.- Detector L3 en el CERN

4.6.- TRANSPORTE

Una vez fabricadas las cámaras se transportaban desde la planta de producción a la zona de pruebas del edificio 2, una vez a la semana. Pasadas las pruebas del control de calidad, las cámaras se embalaban en cajas para su transporte.

Las cámaras debían ir sujetas mediante tensores elásticos para evitar posibles roturas de los hilos durante el transporte en camión por carretera. Se realizaba un envío de cámaras cada seis semanas. En el CERN se volvían a probar y se almacenaban para su instalación en los octantes.

REFERENCIAS

- [1] L3 Collaboration. B.Adeva et al. Nucl. Instr. Meth. A289 (1.990) 35.
- [2] LEP Design Report. C. Wyss. Report CERN-AC-96-01, Vol.3.
- [3] The Muon Spectrometer of The L3 Detector at LEP. Yue Peng. Thesis 1.988.
- [4] <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx>
- [5] Fabricación y verificación de cámaras Z: Manual de procedimiento. C. Willmott, L. Romero y M. Daniel. Nota interna CIEMAT. 1.986.

CAPÍTULO 5

DISEÑO DE PROTOTIPOS PARA CMS

5.1.- PROTOTIPO CT

5.1.1.- INTRODUCCIÓN

El detector CMS, como todos los grandes detectores de partículas, es compacto. En su interior se genera calor procedente de la electrónica de detección; este calor tiene que ser disipado, para que su funcionamiento sea el adecuado.

Se diseñó y fabricó un prototipo de cámara de deriva con el fin de estudiar su conductancia térmica y, en función de los resultados obtenidos, determinar la necesidad de evacuar el calor producido por la electrónica asociada a las mismas, una vez instaladas en el detector CMS. Los ensayos realizados sobre este prototipo preliminar fueron determinantes para asegurar el correcto funcionamiento de las cámaras de deriva ya instaladas en el detector.

La electrónica asociada a las cámaras de deriva, en particular los amplificadores, se calienta, generando una cantidad de calor que necesita ser disipada. Se estimó para la electrónica front-end, un consumo de energía de 50 mW por canal, duplicándose este consumo si se considera el resto de la electrónica asociada. Las cámaras de mayor tamaño de CMS disponen de 1000 canales, por lo que la refrigeración debe ser la necesaria para absorber una potencia 100 W/cámara [1,2].

Este calor generado puede afectar a la estructura mecánica de la cámara, al estar constituida por varios módulos unidos mediante adhesivo (araldit 2012), ya que éste se degrada con el aumento de temperatura, disminuyendo su resistencia mecánica cuando se alcanzan temperaturas comprendidas entre 200 y 300 °C [3].

5.1.2.- DESCRIPCIÓN

El dispositivo experimental (figura 5.1) constaba de:

- Dos depósitos de aluminio de 400 x 400 x 50 mm, prismáticos, estancos y con dos orificios para entrada y salida de agua; los depósitos estaban instrumentados con seis sensores de temperatura AD592AN [4], distribuidos en una de sus caras (figura 5.2) e instalados en un soporte de aluminio (figura 5.3).

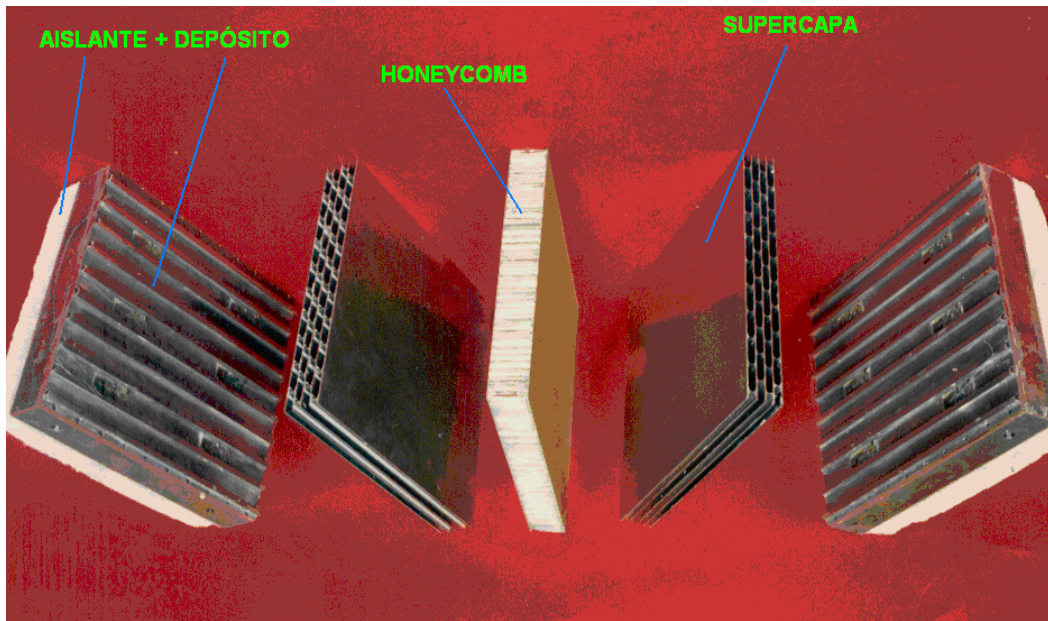


Figura 5.1.- Módulos del prototipo CT

- Dos supercapas de cuatro capas, cada una de ellas con nueve celdas de deriva completas de 40x10 mm. Una de ellas, fabricada con 40 vigas con bandas aislantes de PVC pegadas en ambas alas en toda su longitud; y la otra, fabricada igualmente pero sin aislantes en las vigas.
- Un elemento rigidizador prismático, con estructura interior de panel de abeja (honeycomb) de aluminio de 400 x 400 x 50 mm. Cuatro planchas aislantes de 50 mm de espesor de poliestireno expandido, dos de 400 x 400 mm y dos de 400 x 500 mm. El dispositivo experimental, ensamblado en su totalidad, salvo las planchas aislantes laterales, se observa en la figura 5.4.



Figura 5.2.- Situación de los sensores en los depósitos

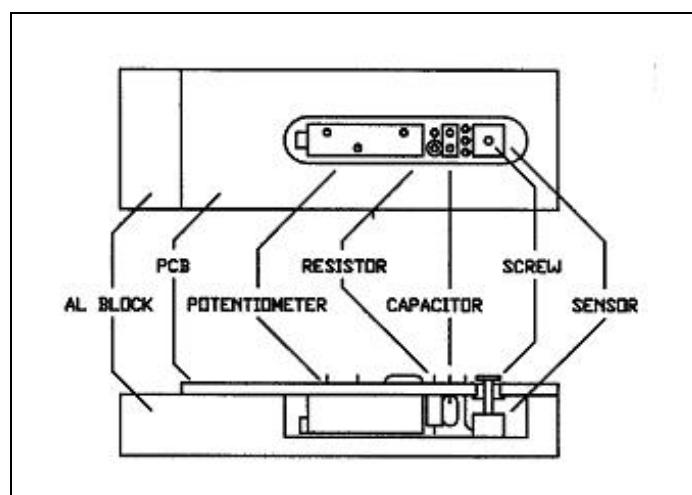


Figura 5.3.- Vistas del módulo sensor

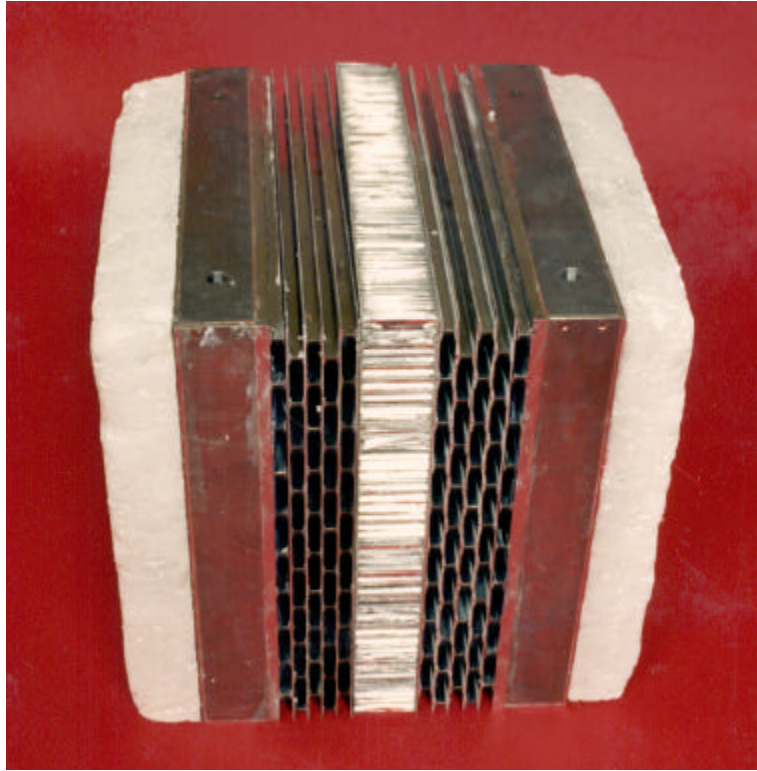


Figura 5.4.- Dispositivo experimental con todos los módulos ensamblados

5.1.3.- CONDUCTANCIA TÉRMICA

Se obtuvieron experimentalmente las conductancias térmicas I de todos los módulos de la cámara CT por separado y las distintas combinaciones de ellos, finalizando con la obtención de la conductancia de la cámara CT completa (figura 5.5), combinación similar a una cámara del detector CMS. A continuación, se exponen los cálculos teóricos correspondientes para asegurar la validez del método experimental.

Se emplearon en los cálculos teóricos la ley de Fourier [5] y la analogía termoeléctrica de la conducción del calor (figura 5.6), obteniéndose resultados congruentes con los experimentales.

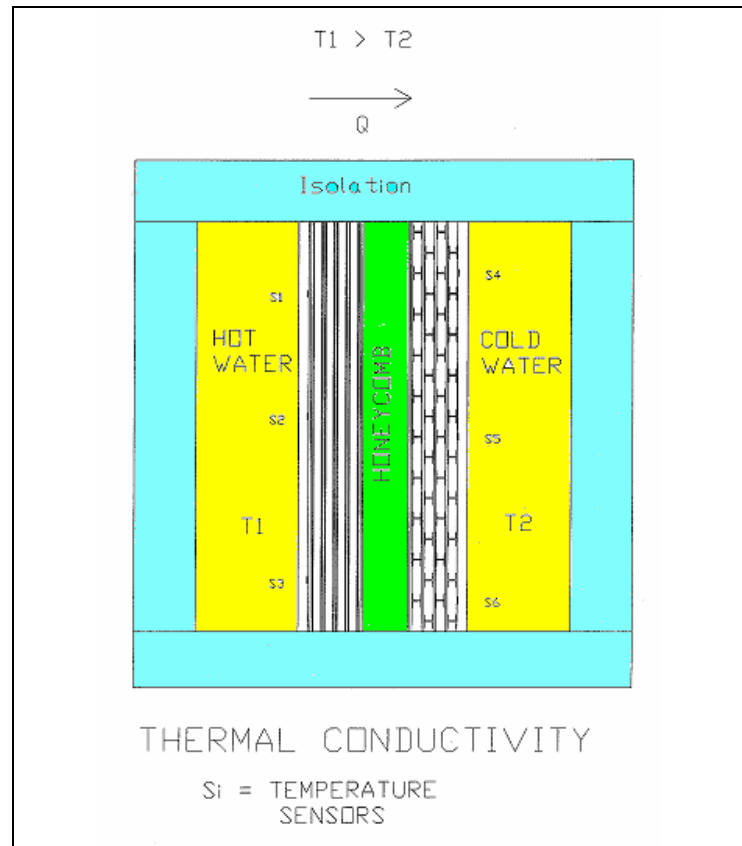


Figura 5.5.- Corte de la cámara DT

El salto térmico viene dado por la expresión:

$$T - T_{\infty} = e^{-a \cdot t} \quad (5.1)$$

siendo $a = \frac{2I}{C}$ (5.2) donde

$$I = \frac{kA}{L} \quad (5.3) \text{ es la conductancia térmica siendo}$$

k = conductividad térmica

A = área perpendicular al flujo de calor

L = longitud transversal

C = capacidad calorífica

$T_1 - T_2$ = variación de la temperatura

t = tiempo transcurrido en la variación de la temperatura.

El experimento consistió en determinar las conductancias de los distintos módulos y sus combinaciones, utilizando los incrementos de temperatura obtenidos a través de las medidas de los sensores colocados en los dos depósitos de agua, en un tiempo determinado (t); uno de ellos lleno de agua caliente a una temperatura entre 40-50 °C y el otro con agua corriente a lo largo de un período de tiempo, hasta acercarse a la temperatura de equilibrio. El error de los sensores es ≤ 0.35 °C.

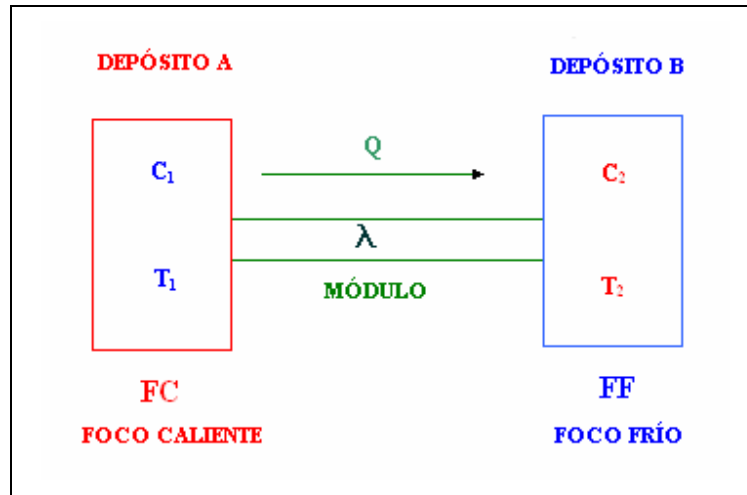


Figura 5.6.- Diagrama utilizado en los cálculos teóricos de las conductancias

La ecuación (5.1) es la de una función exponencial decreciente. Si se representa su gráfica, utilizando escala logarítmica en el eje Y, obtendremos una recta de pendiente $-a$ (5.2). Conocido este parámetro, podremos hallar la conductancia de los distintos módulos y del dispositivo en su totalidad (5.3).

5.1.3.1.- CALIBRACIÓN

Para calibrar este dispositivo, una vez solucionados los problemas de estanqueidad de los depósitos de agua, hallamos la conductancia de los mismos. Para ello, los depósitos fuente y sumidero de calor, se unieron térmicamente y sin ningún módulo en su interior, aislándolos térmicamente (figura 5.7). El valor obtenido es el factor de corrección (resistencia térmica que se aplicará al cálculo de las conductividades de las combinaciones de módulos), para el cálculo de las conductancias.

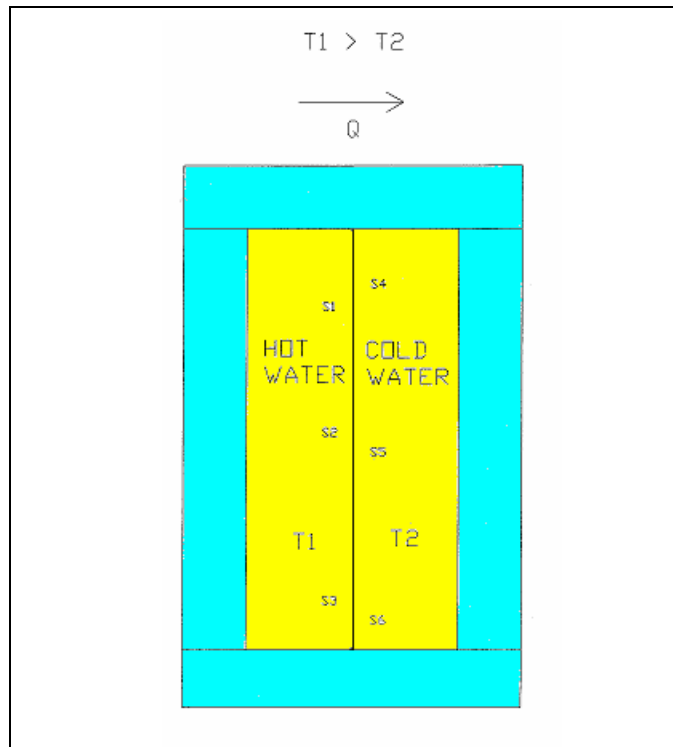


Figura 5.7.- Dispositivo para la medida de la conductancia de los focos térmicos

Los valores de la temperatura registrados por los sensores a lo largo del tiempo se introducen en una hoja de cálculo, obteniéndose la gráfica de la figura 5.8. La línea horizontal de ordenada $T_1 + T_2 / 2$ es la comprobación del correcto funcionamiento cuasi adiabático del dispositivo.

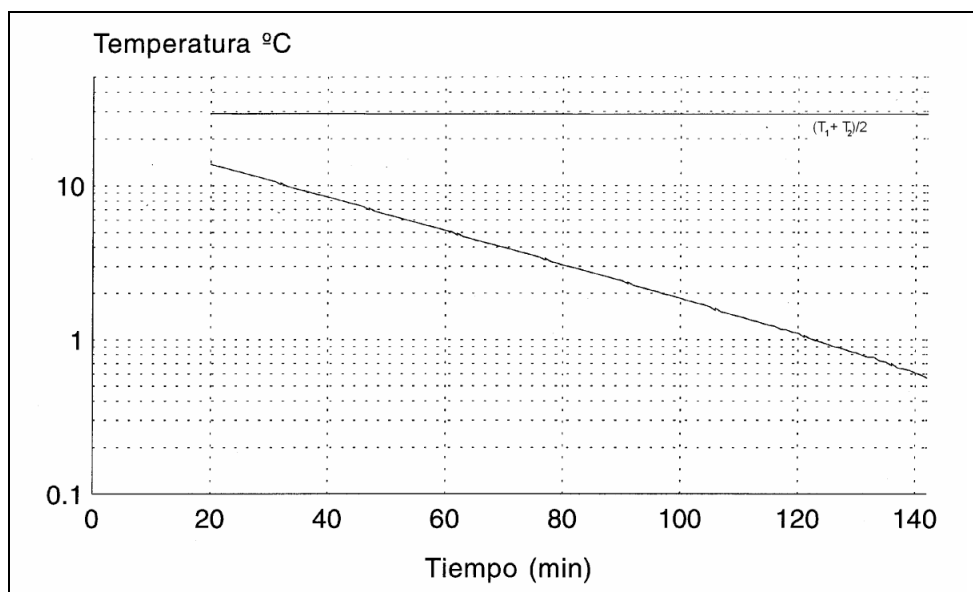


Figura 5.8.- Gráfica de calibración tiempo-temperatura

Para hallar la conductancia se emplea la fórmula (5.2), siendo **a** la pendiente de la recta de la gráfica de la figura 5.8, y que viene dada por la expresión (5.4):

$$\frac{\ln T_1 - \ln T_2}{t_2 - t_1} = \mathbf{a} \quad (5.4)$$

Se obtuvieron los valores:

$$\mathbf{a} = 0.025 \pm 0.001 \text{ min}^{-1} ; \mathbf{I} = 97,457 \pm 0.001 \frac{\text{cal}}{^{\circ}\text{Cmin}} .$$

5.1.3.2.- MEDIDAS DE CONDUCTANCIAS

Se tomaron valores de tiempos y temperaturas para todos los módulos y se obtuvieron las gráficas correspondientes, hallándose los valores indicados en la tabla 5.1. La capacidad calorífica de cada módulo se calcula conociendo su peso y el calor específico del aluminio y demás materiales con los que está fabricado.

MÓDULO	CONDUCTANCIAS ($\frac{\text{cal}}{^{\circ}\text{Cmin}}$)
Supercapa sin aislantes en vigas	$\lambda_{\text{SA}} = 55.799 \pm 0.001$
Supercapa con aislantes en vigas	$\lambda_{\text{CA}} = 14.461 \pm 0.001$
Honeycomb	$\lambda_{\text{H}} = 31.501 \pm 0.001$

Tabla 5.1.- Valores de conductancia de los distintos módulos

En la tabla 5.1 se indican los valores de la conductancia de los distintos módulos, teniendo en cuenta la resistencia térmica introducida por los depósitos R_0 , siendo R_M la de un módulo en concreto. En la figura 5.9 se representa el circuito eléctrico equivalente.

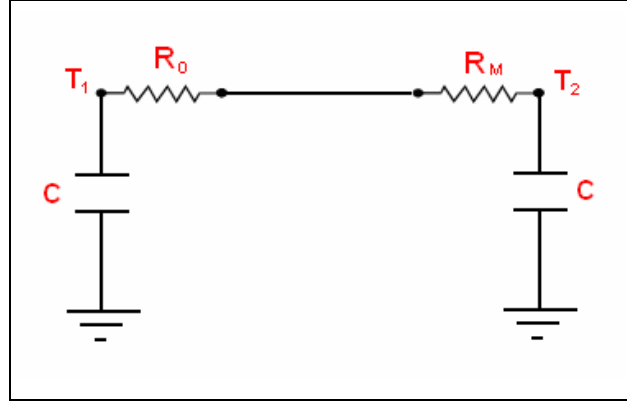


Figura 5.9.- Analogía eléctrica del dispositivo

Una vez obtenidas las conductancias de todos los módulos, se calculó teóricamente la de una cámara de CMS que constaría de tres supercapas, que elegimos sin aislantes en las vigas por su mayor conductancia, y dos estructuras rigidizadoras unidas, que equivaldrían a una de doble grosor. El valor obtenido se calculó a partir de la expresión:

$$\frac{1}{I_C} = \frac{3}{I_{SA}} + \frac{2}{I_H} \quad (5.5) \text{ siendo } I_C \text{ la conductancia de la cámara.}$$

Utilizando los valores de la tabla 5.1 obtuvimos $I_C = 8.53 \pm 0.01 \frac{\text{cal}}{^{\circ}\text{C min}}$. En los módulos de la cámara CT, la superficie de intercambio de calor es de 400 x 400 mm; para dar un valor independiente del tamaño de las cámaras, hallamos la conductancia por unidad de superficie que fue $I = 53.31 \pm 0.01 \frac{\text{cal}}{^{\circ}\text{C min m}^2}$.

5.1.4.- APLICACIÓN

A partir del cálculo anterior podemos estimar el salto de temperatura global del detector CMS y determinar la necesidad de refrigeración y su tipo. El detector CMS tiene un diámetro de 15 m las cámaras de muones están organizadas en capas alrededor del tubo de vacío por el que circulan los haces (figura 5.10). Las distancias a las que se encuentran las cámaras con respecto al punto de interacción están indicadas en la figura 5.11.

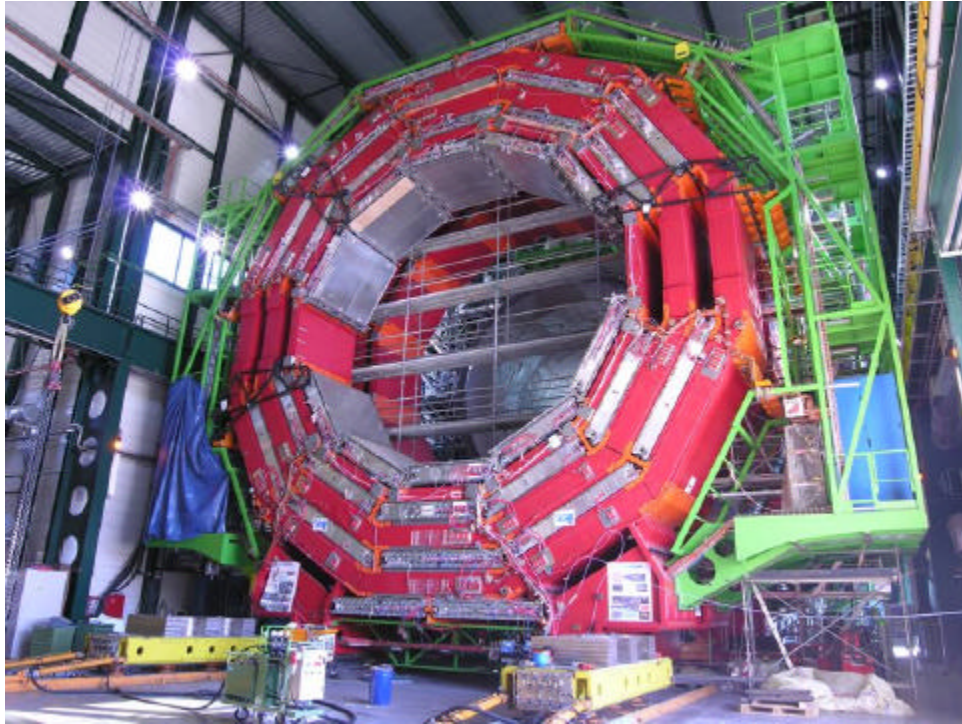


Figura 5.10.- Vista frontal del detector

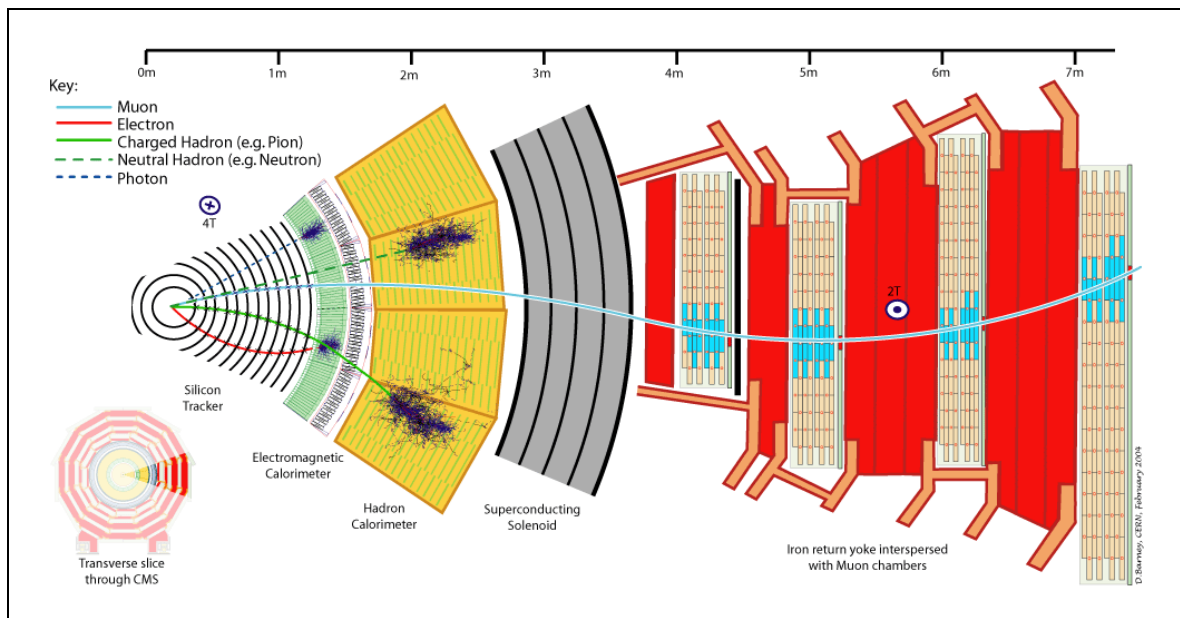


Figura 5.11.- Distancias de las cámaras de deriva al IP

Para simplificar el cálculo supusimos que cada capa de cámaras está situada en circunferencias concéntricas con centro en el punto de interacción (figura 5.12).

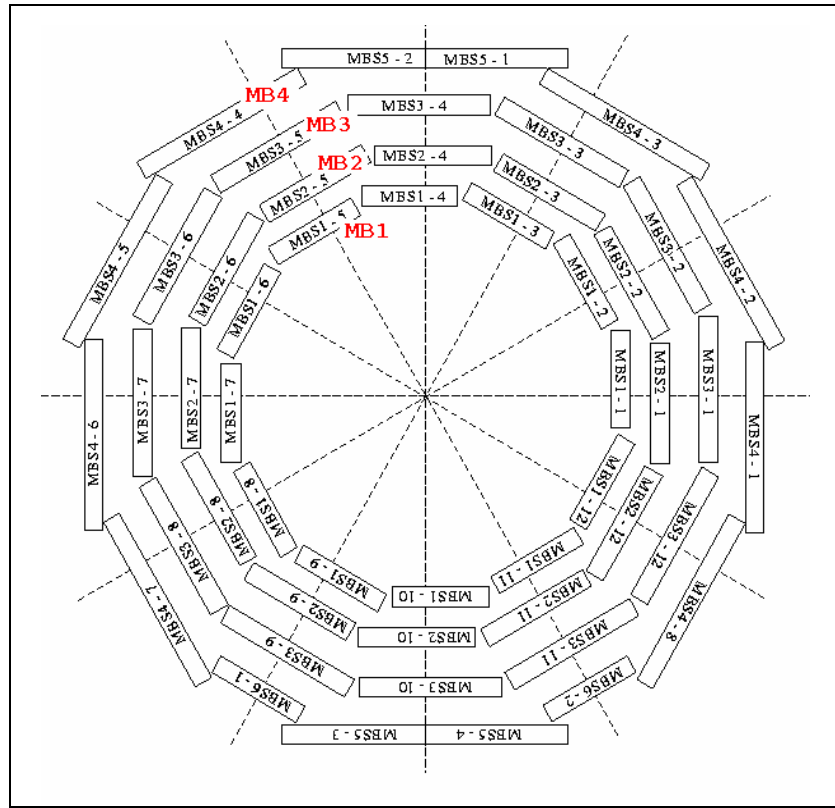


Figura 5.12.- Situación en el detector de los tipos de cámaras de deriva de CMS

Las cámaras de cada una de las cuatro capas tienen diferentes dimensiones (tabla 5.2), y se denominan desde el PI hacia el exterior, MB1, MB2, MB3 y MB4 respectivamente (figura 5.12).

	Sector	Dimensiones		
		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
MB1 Station	all	1990	290	2536
MB2 Station	all	2450	290	2536
MB3 Station	all	3030	290	2536
MB4 Station	Average		290	2536

Tabla 5.2.- Dimensiones de las cámaras de deriva de CMS [6]

La analogía eléctrica será la de la figura 5.13. Donde $Q_1 = P \cdot S_1$ (5.6) es el flujo de calor que atraviesa la superficie S_1 de todas las cámaras MB1, siendo P la potencia calorífica de cada una de ellas por unidad de superficie. ΔT_1 es el incremento de

temperatura en la estación MB1; igualmente las expresiones para las demás estaciones MB2, MB3 y MB4 vendrán dadas por las expresiones:

$$Q_2 = P \cdot S_2 \quad (5.7)$$

$$Q_3 = P \cdot S_3 \quad (5.8)$$

$$Q_4 = P \cdot S_4 \quad (5.9)$$

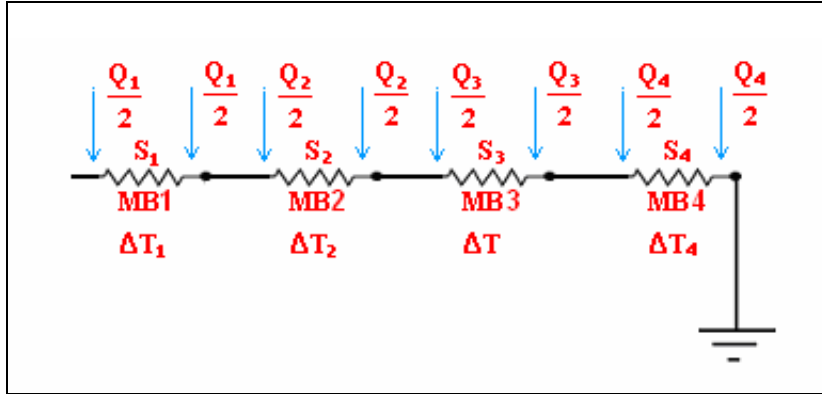


Figura 5.13.- Analogía eléctrica de la conducción del calor en CMS

El salto térmico total será el dado por la expresión:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \Delta T_4 \quad (5.10), \text{ siendo:}$$

$$\Delta T_1 = P / 2\lambda \quad (5.11)$$

$$\Delta T_2 = P / \lambda \quad (S_1 / S_2 + 1/2) \quad (5.12)$$

$$\Delta T_3 = P / \lambda \quad (S_1 / S_3 + S_2 / S_3 + 1/2) \quad (5.13)$$

$$\Delta T_4 = P / \lambda \quad (S_1 / S_4 + S_2 / S_4 + S_3 / S_4 + 1/2) \quad (5.14)$$

Como vimos anteriormente la potencia disipada por cada cámara son 100 W; considerando que el valor de la superficie de transferencia de cada cámara tiene el valor de 2.5 x 2.5 m, obtenemos un valor de $P = 229.5 \pm 0.5 \text{ cal/min m}^2$. Las superficies de transferencia total de cada tipo de cámara será $S_i = 2\pi R_i Z$, siendo Z la longitud común a todas las cámaras 2,5 m y R_i la distancia radial desde el PI hasta cada tipo de cámara (figura 5.11). El valor obtenido para el salto térmico resulta $\Delta T = 25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.1.5.- CONCLUSIONES

La disipación del calor generado en aire no es posible, debido a la compacidad del detector, en cuyo interior se forman incluso bolsas de aire caliente; por lo que es necesario una refrigeración mediante un fluido, siendo la solución más ventajosa la refrigeración por tuberías de agua, utilizada con relativo éxito, en el pasado, en el detector L3 de LEP.

Este salto térmico, que es un valor medio, es incompatible con el correcto funcionamiento de la electrónica asociada a las cámaras de deriva que es una importante fuente de calor.

Es necesario, por tanto, diseñar la refrigeración utilizando tuberías de pequeño diámetro, adecuado al espacio disponible en los laterales de las cámaras, a lo largo de todo el detector (10 m). Se evita así que la temperatura del agua circulante sea inferior a la temperatura de rocío dentro del detector, para que no se condense el vapor de agua sobre ellas, pudiendo el agua condensada inutilizar la electrónica en su totalidad. Una temperatura del agua, a la entrada del circuito de refrigeración, entre 16-18°C, sería la adecuada para conseguir este objetivo en el emplazamiento subterráneo del detector [1].

5.2.- PROTOTIPO DE TAMAÑO REDUCIDO

5.2.1.- INTRODUCCIÓN

En este apartado se describe la fabricación y las pruebas realizadas a un prototipo de cámara de deriva para el detector central de muones de CMS. Este prototipo constaba de cuatro supercapas, con cuatro capas de celdas de deriva cada una. Se construyó durante los primeros cuatro meses del año 1996, trasladándose posteriormente al CERN, donde se tomaron datos durante un mes para evaluar su comportamiento y prestaciones al ser sometido a un haz de muones de alta energía.

Su construcción permitió valorar y fijar los procedimientos de fabricación, con vistas a la producción en serie de cámaras de deriva para el detector CMS. Los resultados

que se obtuvieron han sido objeto de varias publicaciones, junto con los obtenidos por otros grupos de la colaboración CMS [7,8].

Se elaboró una programación de toma de datos en la que se estudiaron las variables más relevantes para la operación de CMS en sus rangos de interés. El plan incluía comprobar el comportamiento del prototipo respecto a:

1. El ángulo de incidencia de un muón respecto al plano de las celdas.
2. La dependencia con los diferentes valores de los potenciales de los electrodos que definen el campo eléctrico en el interior de cada celda.
3. La dependencia con las diversas componentes del campo magnético que afectarán a algunas cámaras durante la operación en CMS.
4. La dependencia con la electrónica empleada. Se estudió la eficiencia en la detección frente al umbral de discriminación de la señal.

5.2.2.- CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

5.2.2.1.- CARACTERÍSTICAS

Los tubos de deriva del prototipo construido tenían una longitud de 0.5 m, aproximadamente la cuarta parte de la longitud de las celdas que se usarán en el detector CMS (2.5 m). Las celdas se distribuyeron en 4 capas, de 12 celdas cada una (48 tubos de deriva); cada una de estas agrupaciones constituía una supercapa. Las capas segunda y cuarta estaban desplazadas respecto a las capas primera y tercera media celda, con el propósito de determinar el lado de la celda por la que pasó el muón (ambigüedad izquierda-derecha).

El prototipo de cámara estaba formada por 4 supercapas apiladas y por una estructura rigidizadora de aluminio (honeycomb) de 10 cm de espesor, colocada entre las supercapas segunda y tercera. Las supercapas se dispusieron de manera que los hilos de la primera y tercera capa fueran paralelos entre sí y perpendiculares a los de las supercapas segunda y cuarta.

Cada celda (figura 5.14) tenía una sección rectangular de 40 mm x 11 mm, estando formadas por dos vigas I de aluminio, de 10 mm de altura, 9 mm de ala, y 1 mm de espesor, que definían los laterales de la celda. Las partes superior e inferior estaban delimitadas por planchas de aluminio de 2 mm de espesor conectadas a tierra.

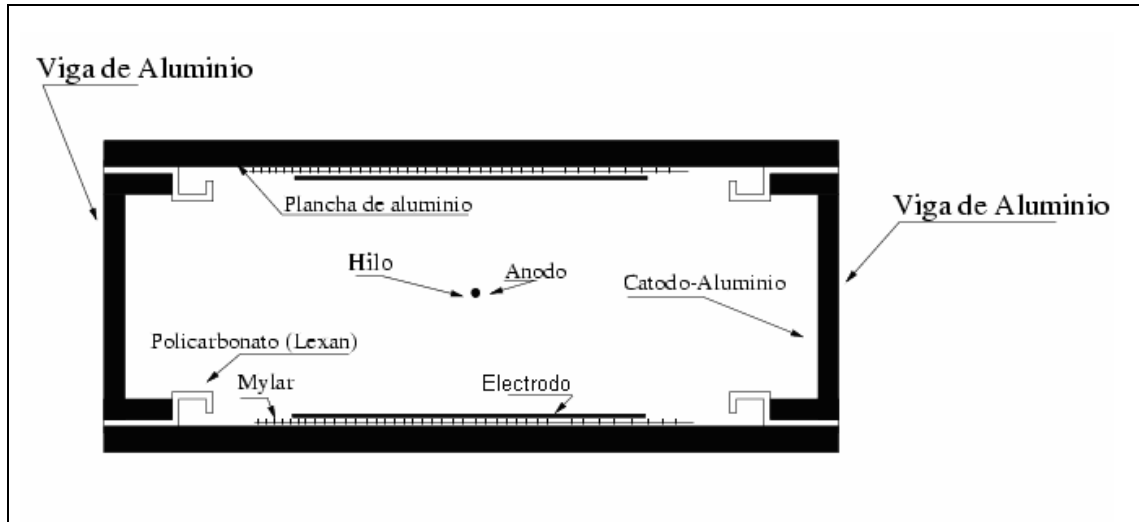


Figura 5.14.- Esquema de celda de deriva del prototipo

Entre las vigas y las planchas de aluminio conectadas a masa, se colocaba un aislante de polycarbonato extruido (Lexan) [7] de 0.5 mm de espesor. Las vigas, los aislantes, y las planchas, se pegaban con adhesivo epoxídico (Araldit 2012) [9] de dos componentes. En el centro de la celda se encontraba el ánodo, que era un hilo de acero inoxidable (AISI-304L), de 50 μm de diámetro.

Adheridos a las planchas superior e inferior, y enfrentados al hilo anódico, se disponían unos electrodos conformadores del campo eléctrico, para uniformizarlo en la región central de la celda, garantizando la linealidad espacio-tiempo. Estos electrodos eran bandas de cobre de 18 μm de espesor y 14 mm de anchura, unidas a una banda soporte de Mylar [7] de 0,1 mm de espesor y 20 mm de ancho, y colocadas en su centro.

Las bandas de Mylar se autoadherían a las planchas de aluminio. En los extremos de estos electrodos había una zona de 5 mm de Mylar sin cobre, para evitar descargas con el plano de masa.

Los extremos del hilo anódico estaban colocados dentro de las ranuras de dos bloques cúbicos de latón de 4 mm de lado (figura 5.15), siendo posteriormente fijados a los mismos, con el recubrimiento del material procedente de la deformación de las ranuras, mediante presión.

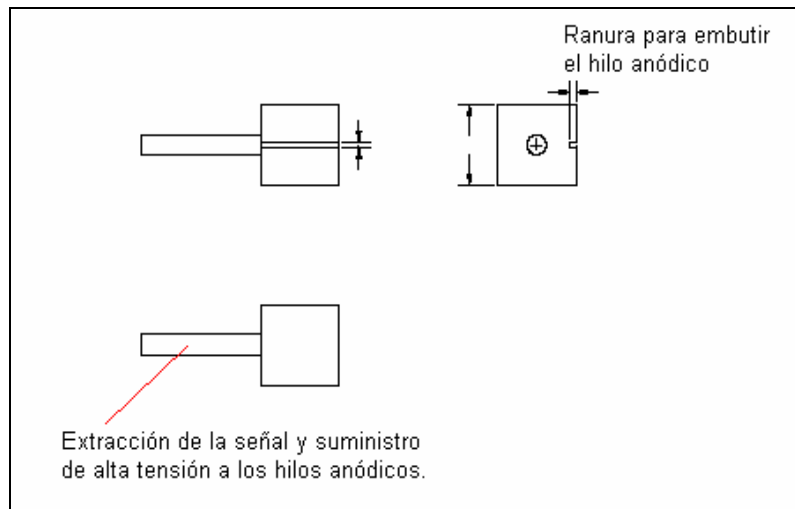


Figura 5.15.- Vistas de un bloque de latón

Cada hilo era colocado en el prototipo, insertando los bloques de sus extremos en una pieza portahilos (End-plug) de plástico inyectado (Uranil) [7] cargado con fibra de vidrio, tal como se indica en la figura 5.16. El hilo estaba guiado dentro del portahilos por una rampa triangular que lo posicionaba en el centro de la celda. El portahilos se mantenía en su posición por la tensión mecánica del hilo y disponía de un taladro donde se alojaba un muelle que suministraba alta tensión a los electrodos de cobre.

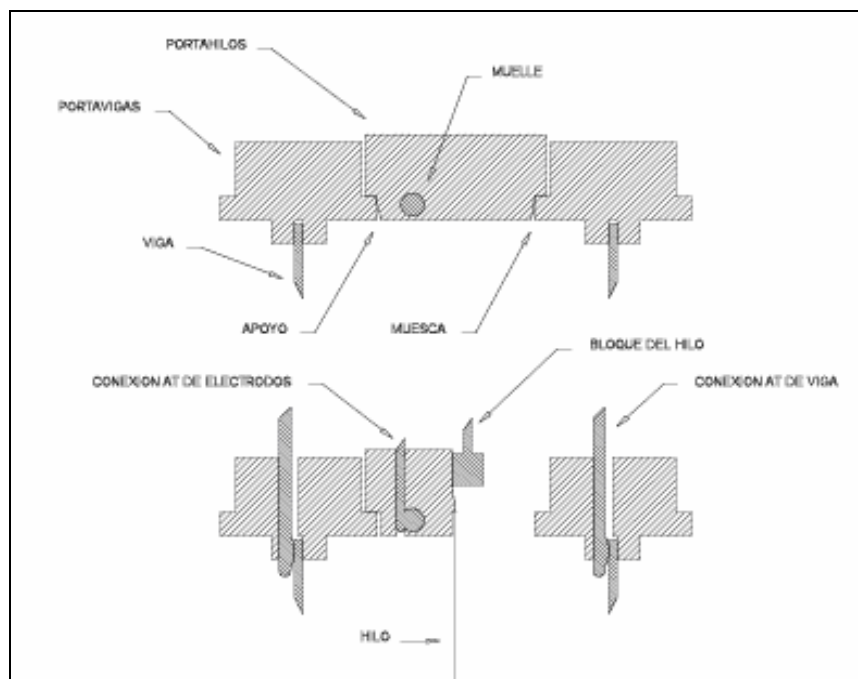


Figura 5.16.- Secciones de las piezas portahilos y portavigas posicionadas

Los extremos de las vigas estaban posicionados por dos bloques portavigas de Uranil. Estos bloques poseían un orificio central por el que se alimentaba eléctricamente a la viga que actuaba como cátodo. Estaban pegados a los aislantes de Lexan y disponían de unos salientes que sujetaban a las piezas portahilos, absorbiendo la tensión mecánica de los hilos, y manteniendo estable el conjunto portahilos-portavigas (figura 5.16)

La estanqueidad de las cámaras se consiguió mediante un cierre de gas para cada supercapa, a lo largo de todo su contorno. Se optó por un diseño individual para maximizar el volumen activo de la cámara, sin interferir con la estructura rigidizadora. Cada supercapa contaba con una pletina lateral de aluminio, paralela a los hilos, de 5 mm de espesor, que se unía a las planchas exteriores de las capas primera y cuarta mediante perfiles cuadrados de 10 mm.

En el lado perpendicular a los hilos, el cierre era un perfil en L, de 20 x 20 x 52 mm, que, a través de tres ventanas, permitía, en un lado, el emplazamiento de circuitos impresos con los condensadores de desacoplo y con conectores para conducir las señales (figura 5.17); y, en el lado opuesto, la instalación de las tarjetas que suministraban la alimentación para la alta tensión a electrodos y vigas.

Estas ventanas se cerraban con tapas de aluminio, atornilladas y selladas con juntas tóricas de silicona, estando estos componentes inmersos en el volumen del gas. En el lado de la señal, las tapas de las ventanas tenían pasamuros para el paso de las señales desde el interior de la supercapa al exterior. De estos pasamuros partían los cables planos hacia el preamplificador. El sellado de los pasamuros se efectuaba con Araldit.

La alimentación de alta tensión se realizaba a través de pasamuros de teflón en el perfil en L, del lado de la señal para los hilos y del lado opuesto para vigas y electrodos. En el interior de la supercapa, un tubo de aluminio de sección rectangular distribuía uniformemente el gas, estando adherido al perfil en L y a las chapas exteriores con adhesivo.

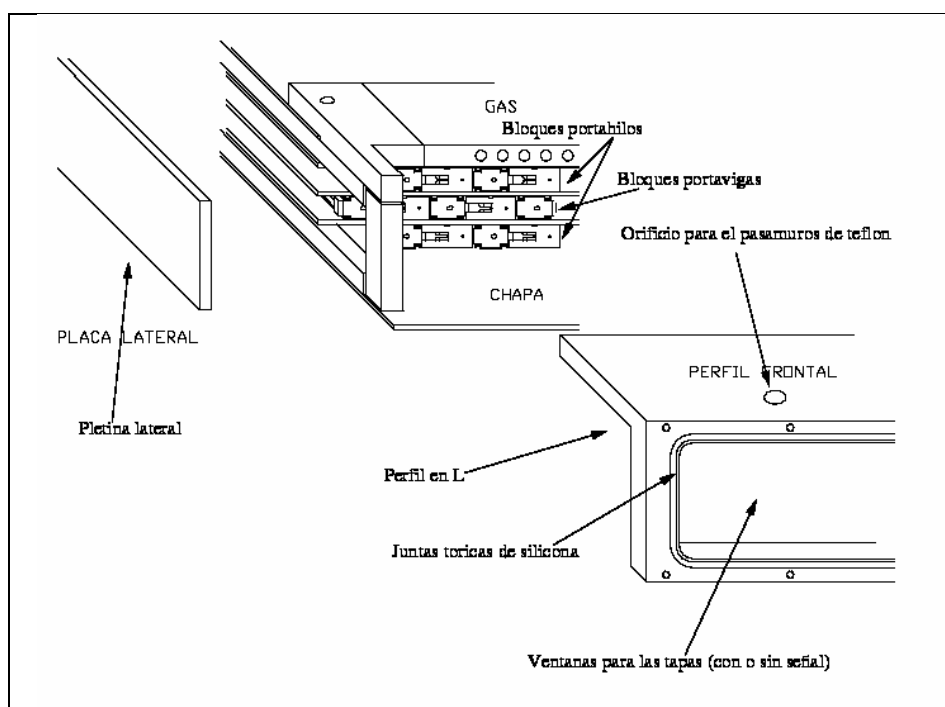


Figura 5.17.- Detalle del cierre de gas en la esquina de una supercapa

5.2.2.2.- PROCEDIMIENTO DE MONTAJE

- UTILLAJE

La cámara constaba de cuatro supercapas independientes ensambladas. Cada supercapa se fabricaba previamente. Para su construcción se requería el montaje previo de

algunos de sus componentes: los hilos anódicos embutidos en los bloques de latón, las vigas catódicas con los aislantes de Lexan, los bloques portavigas y las planchas de aluminio con los electrodos de cobre.

Los hilos se atenazaban al bloque de latón mediante una prensa de aire comprimido, pudiéndose ajustar su longitud [7]. Para pegar los electrodos a las planchas se utilizaba una plantilla de aluminio de su mismo tamaño. Esta plantilla constaba de unas ranuras para el alojamiento de los electrodos que se mantenían en la posición deseada mediante vacío. La precisión necesaria en su posición se garantizaba con unos topes rectificados.

Los aislantes de Lexan se pegaban a las vigas con Araldit mediante una plantilla. Las supercapas se montaban sobre un banco de granito de 1 m x 1 m, en el que se instaló un sistema de referencia con bloques de acero (figura 5.18), respecto a los que se posicionaban los hilos de las diferentes capas.

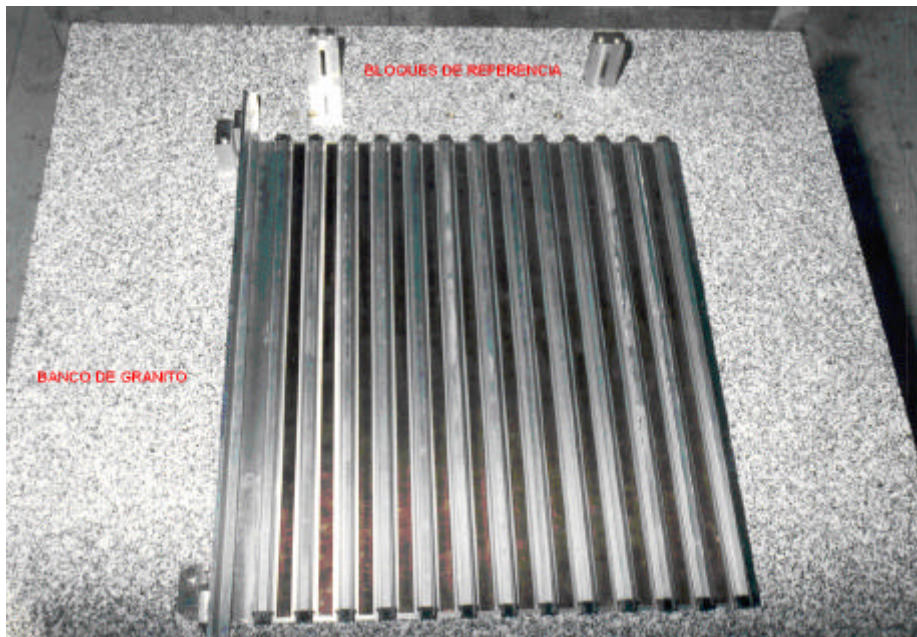


Figura 5.18.- Banco de montaje y bloques de referencia

Para el pegado de las vigas a las planchas de aluminio se diseñó y fabricó un dispensador de pegamento, implementado en un coordinatógrafo de dos dimensiones, que distribuía el adhesivo automáticamente en toda la longitud de cada viga. El movimiento, según los ejes X e Y, se obtenía mediante motores de corriente continua.

El posicionado del cabezal distribuidor de adhesivo se controlaba mediante codificadores rotatorios que enviaban sus señales a tarjetas, dotadas de registros de control, utilizando circuitos FPGA (Field Programmable Gate Array) de Actel [11].

El control se realizaba mediante un procesador insertado en un bus VME (VersaModule Eurocards Bus) que controlaba las tarjetas VME, en donde se encontraban los circuitos FPGA. Unas tarjetas de potencia, controladas desde los FPGA, alimentaban los motores (figura 5.19)

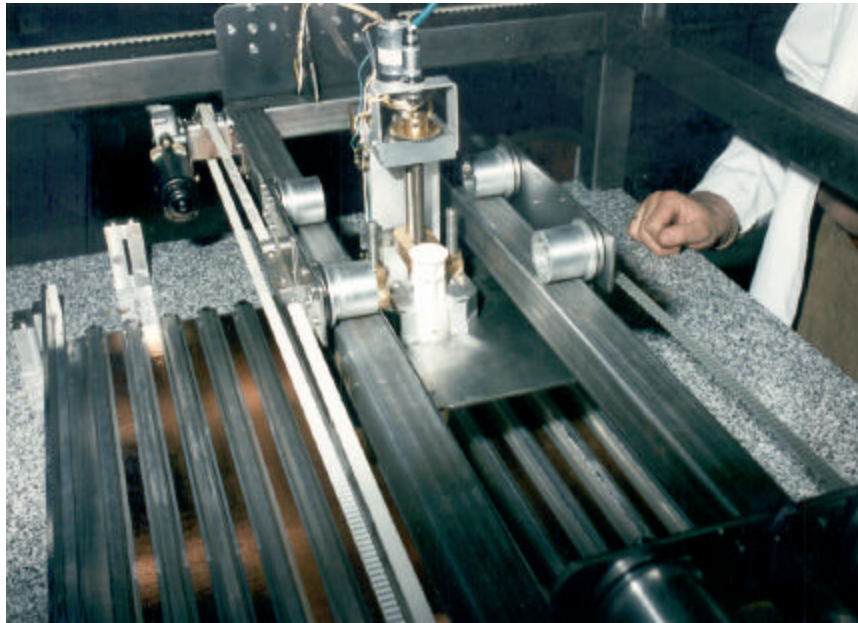


Figura 5.19.- Dispensador de adhesivo

El útil portavigas se muestra en la figura 20. Los bloques portavigas se sujetaban al útil mediante unos flejes que los presionan sobre unas fijas de acero. Como los bloques portahilos se apoyaban sobre los bloques portavigas, la precisión en el posicionado de los hilos dependía de estas fijas.

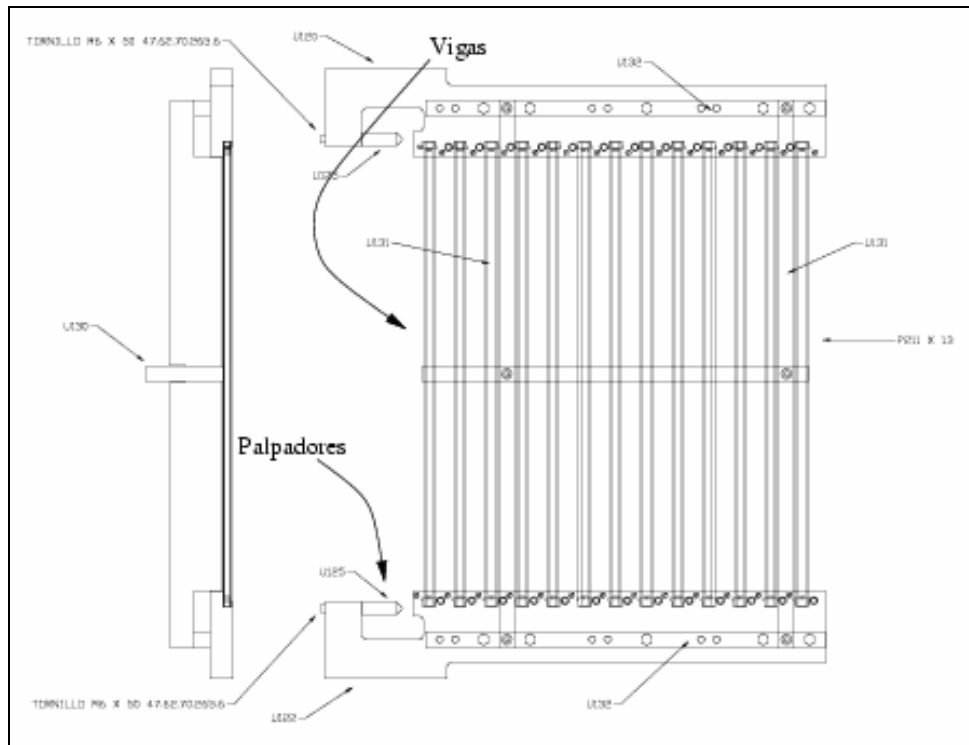


Figura 5.20.- Colocación de vigas en el útil

- FABRICACIÓN

La referencia global de cada supercapa venía dada por dos superficies o bloques, que se atornillaban a los bloques de referencia del mármol de montaje, como se indica en la figura 5.21.

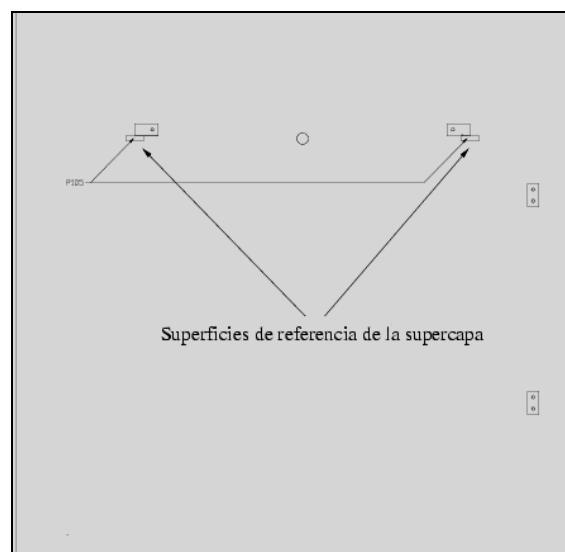


Figura 5.21.- Situación de los bloques de referencia

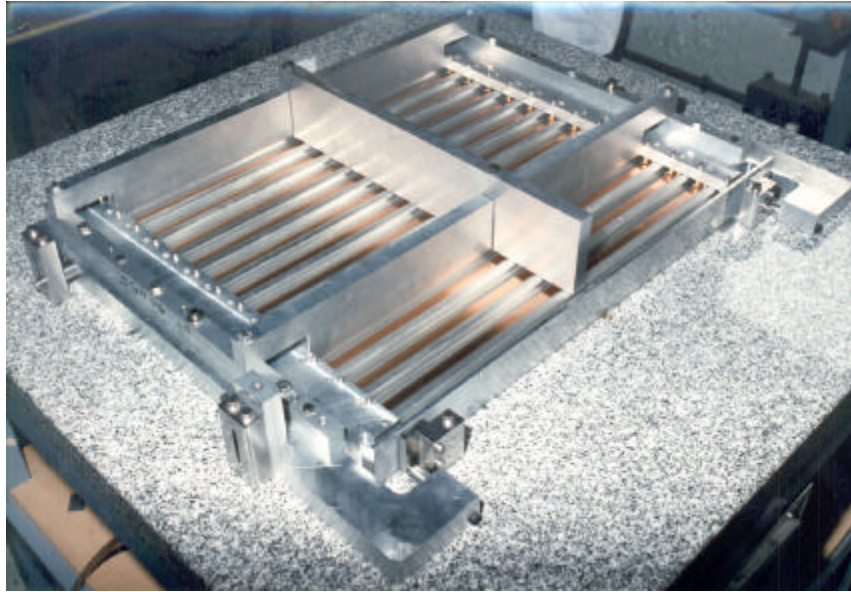


Figura 5.23.- Útil de vigas en el proceso de curado del adhesivo

A continuación se procedía a disponer los hilos, que habían sido previamente atenazados a los bloques de latón como se indicó con anterioridad, y se colocaban los resortes de contacto de los electrodos (figura 5.24).

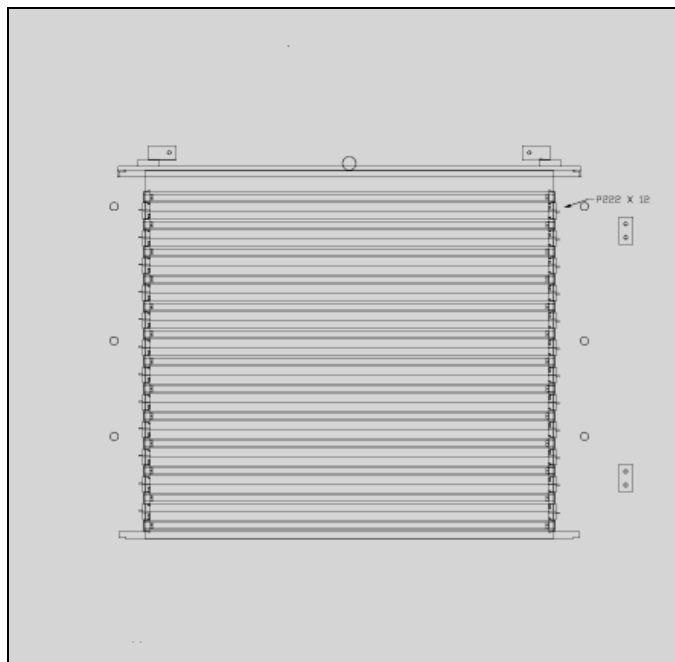


Figura 5.24.- Colocación de hilos en la primera capa

El proceso de construcción continuaba con el pegado de la siguiente plancha de aluminio con electrodos en ambas caras (figura 5.25).

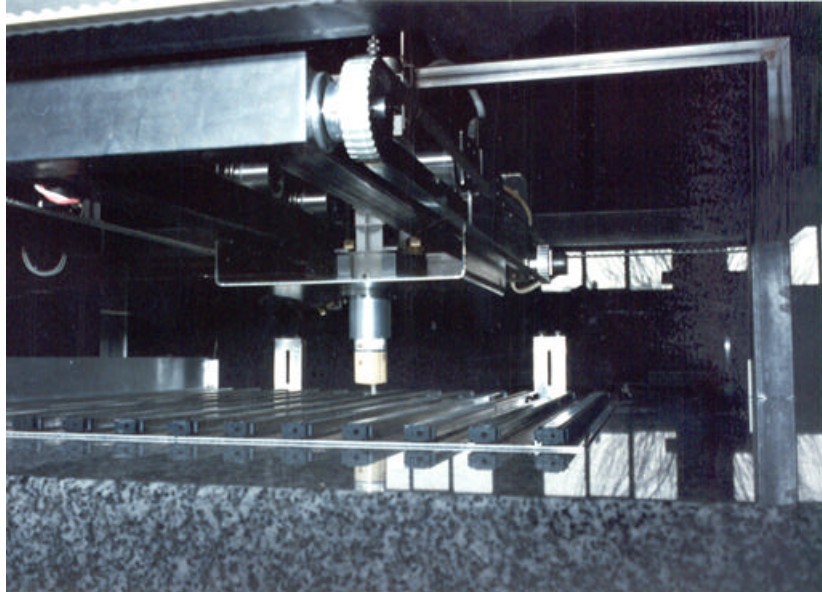


Figura 5.25.- Dispensado de pegamento sobre las vigas

El siguiente paso consistía en el pegado de otra capa de vigas, pero con el útil provisto de palpadores de longitud 20 mm superior, ya que capas consecutivas estaban desplazadas media celda una con respecto a otra (figura 5.26). También se modificaba la altura del útil añadiendo espaciadores Z.

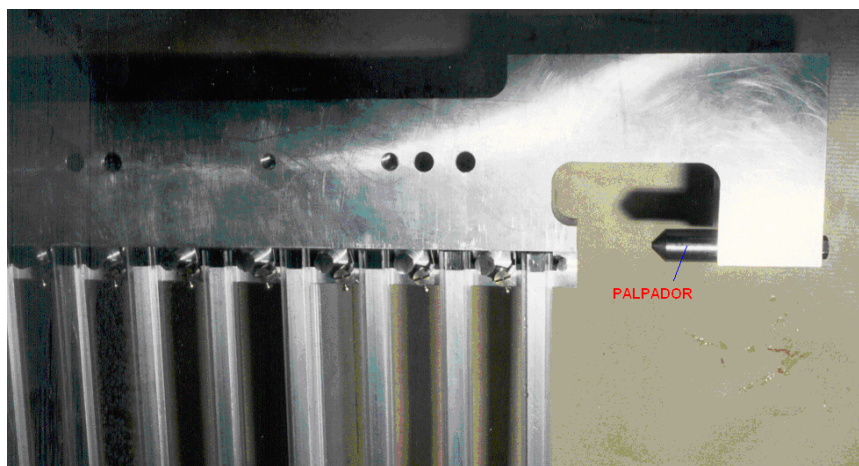


Figura 5.26.- Detalle del palpador del útil portavigas

La terminación definitiva de la supercapa requería diversas tareas adicionales: pegado del cierre de gas, instalación de pasamuros para la alta tensión, montaje de circuitos impresos de señal, montaje de circuitos impresos de distribución de alta tensión a vigas y electrodos, y conexión de tomas de tierra a planchas intermedias [7]. El procedimiento descrito se repetía hasta completar cuatro supercapas.

5.2.3.- CONTROL DE CALIDAD

Se controlaron tres parámetros fundamentales para el funcionamiento del prototipo: La precisión en el posicionado de los hilos, la estanqueidad y su comportamiento a alta tensión.

5.2.3.1.- PRECISIÓN EN EL POSICIONADO DE HILOS

El procedimiento de construcción de la cámara pretendía asegurar el posicionamiento de los hilos anódicos con una determinada precisión, ya que eran los elementos sensibles con los que se mediría la posición de paso de un muón. Esto requirió un diseño especialmente cuidadoso de los elementos que influían en dicha precisión: el útil portavigas, sobre cuyas fijas apoyaban los bloques portavigas, empujados por los flejes; el bloque portahilos, que apoyaba sobre el anterior; y los bloques de referencia de la mesa.

La coordenada crítica es la coordenada Y que representa la separación entre hilos y da la posición de paso del muón. Los ejes X e Y se pueden ver en la figura 5.22. Las medidas obtenidas con un sistema de interferometría láser [12], con un error inferior a las 30 μm , dieron como resultado una desviación, respecto a la posición nominal, no superior a las 100 μm . Este resultado se obtuvo para todas las capas de cada supercapa.

En la figura 5.27 se muestran los resultados de las medidas de las diferencias en las posiciones de los hilos respecto a su posición nominal para una capa. Los resultados evidencian la bondad del procedimiento que se siguió para asegurar una precisión de 100 μm en su posicionamiento.

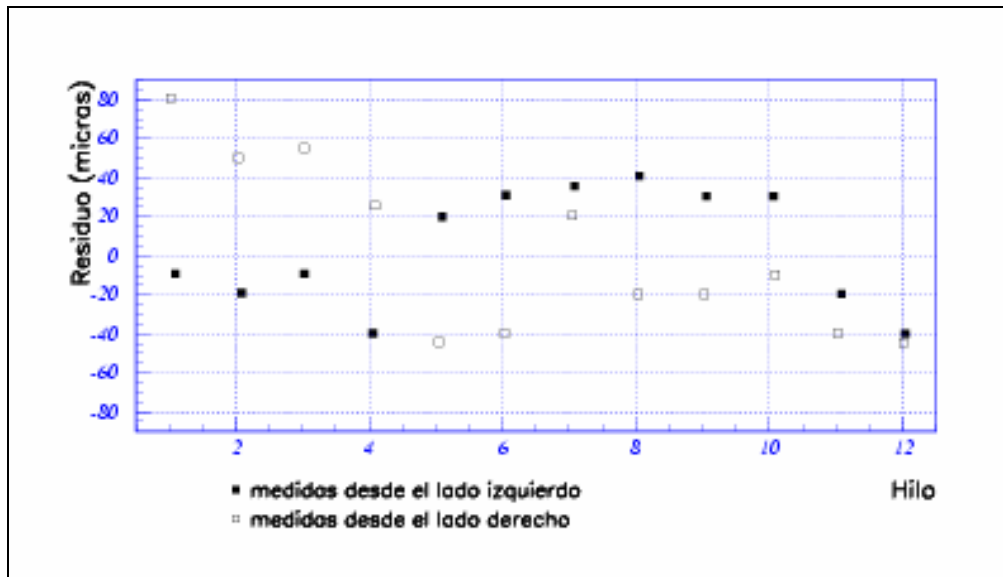


Figura 5.27.- Diferencia entre las posiciones de los hilos respecto a la posición nominal

5.2.3.2.- ESTANQUEIDAD

La cámara fue sometida a una prueba de fugas de gas con el fin de comprobar su estanqueidad, requisito sin el cual no podía garantizarse la ausencia de oxígeno de la mezcla de gases con la que se operaba. Para detectar los lugares donde había fugas se utilizó un medidor de fugas por conductividad térmica del aire [13].

Tras cubrir con adhesivo epoxi algunos bordes de la cámara, con el fin de eliminar fugas residuales, se introducía una sobrepresión de 0.02 atm respecto a la presión atmosférica; eran necesarias 2 horas para que desapareciese ésta, resultando un flujo de gas de unos 0.16 l / h.

En la toma de datos en el CERN (figura 5.28) se controló el nivel de oxígeno en el gas siendo inferior a 60 partes por millón.

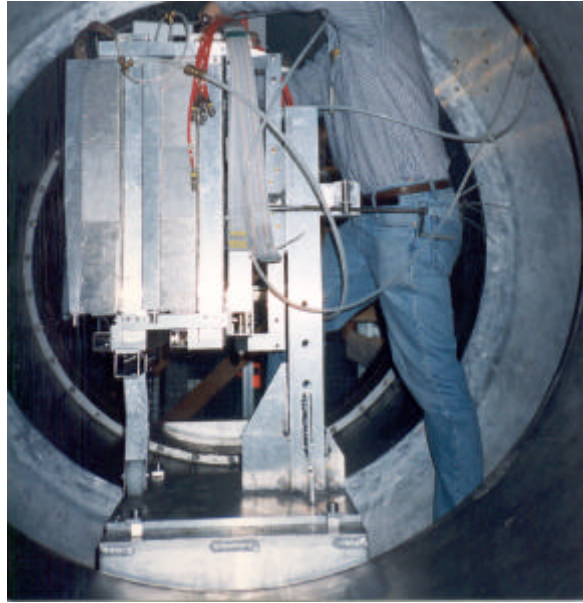


Figura 5.28.- Prototipo en el haz de pruebas del CERN

5.2.3.3.- ALTA TENSION

La cámara prototipo fue sometida a una prueba de alta tensión, para lo cual sus electrodos se mantuvieron a tensiones de 6000 V en aire y cercanas a las tensiones de operación: 3300 V para los hilos, 1500 V para los electrodos conformadores de campo, y -1500 V para las vigas, en una mezcla de gas Ar-CO₂.

Esta prueba se realizó durante varios días, a fin de detectar posibles puntos de descarga; en tal caso se procedía a su eliminación con recubrimiento aislante (Gliptal). Tras la eliminación de las descargas, las fugas en hilos y vigas se mantuvieron por debajo de 1 μ A, que era la sensibilidad de corriente de las fuentes de alta tensión empleadas.

5.3.- PROTOTIPO DE TAMAÑO REAL MB96

5.3.1.- INTRODUCCIÓN

El prototipo, cuya prueba y resultados describiremos a continuación, fue un prototipo a escala real de una cámara del tipo MB1 del Detector Central de Muones

denominado MB96. Su fabricación y pruebas supusieron un hito importante en el programa de desarrollo del Grupo del Detector Central de Muones. La cámara MB96 sintetiza la experiencia acumulada en la fabricación de prototipos y útiles, así como en prestaciones y funcionamiento de los mismos.

La fabricación, que contó con la participación de personal del CIEMAT, se realizó en el IFN de Legnaro (Italia), y fue el resultado de la colaboración de todos los Institutos que participaban en el Detector Central de Muones de CMS. El CIEMAT intervino en el diseño y aportó el útil para el posicionado y pegado de electrodos, así como un dispensador automático de adhesivo. También participó en la toma de datos con rayos cósmicos, y en la puesta a punto de la cámara, con anterioridad a su envío a la zona experimental H2, en el CERN.

Se desarrolló, asimismo, un sistema de control de alta tensión, para facilitar la modificación de las tensiones de operación de los electrodos y demás parámetros relacionados, durante las pruebas realizadas en el CERN. La toma de datos se realizó de manera conjunta, siendo posteriormente analizados por los diferentes Institutos de la colaboración. Los resultados obtenidos con MB96 fueron muy satisfactorios [14]

5.3.2.- DESCRIPCIÓN

El diseño conceptual de MB96 era el de una cámara Tipo MB1. Estaba formada por tres módulos (supercapas), compuestos cada uno de ellos por cuatro planos (capas) de tubos de deriva rectangulares (celdas), desplazados media celda un respecto a otro. Todas las supercapas estaban superpuestas y unidas con adhesivo, intercalando un panel rigidizador entre la segunda y tercera supercapa, para dar mayor rigidez al conjunto (figura 5.29).

Los hilos de las dos supercapas exteriores SL1 y SL3 eran paralelos a la línea del haz tomando como referencia el detector CMS, mientras que los de la supercapa interior SL2 eran perpendiculares. Sus dimensiones eran 1990 mm x 2536 mm x 290 mm. La celda de MB96 era de 40 mm x 13 mm, similar a la del prototipo CIEMAT, salvo pequeños cambios en las dimensiones de la viga que, en el caso de MB96, tiene un espesor de 1.2 mm, una altura de 9.6 mm y un ala de 7 mm.

El diseño del bloque portahilos también se modificó parcialmente [14]. La disposición de los electrodos, el aislante de las vigas, hilo anódico y material utilizado en la fabricación de MB96 fue el mismo que el utilizado en el prototipo a pequeña escala. La figura 5.29 muestra una esquina de la cámara MB96, en la que se ven las tres supercapas, el panel rigidizador, los conectores de alta tensión, el sistema de distribución de gas, y los bloques que referencian externamente la posición de los hilos.

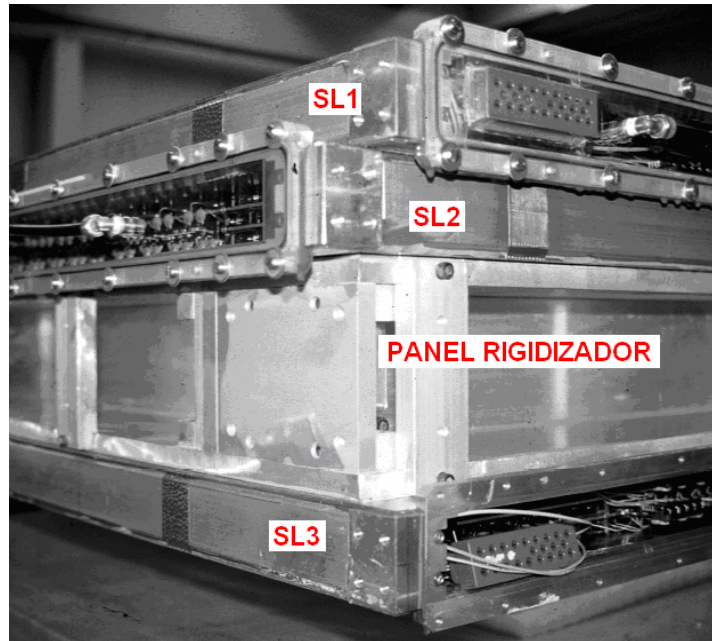


Figura 5.29.- Vista de una esquina del prototipo MB96.

5.3.3.- TOLERANCIAS OBTENIDAS

La precisión en la mecánica de una cámara viene impuesta por la necesidad de obtener una resolución global en (R, Φ) de $100 \mu\text{m}$. Este objetivo se consigue obteniendo ocho puntos de la trayectoria del muón en dos supercapas, si la resolución de cada hilo es mejor que $250 \mu\text{m}$. Con el fin de obtener una resolución global en la cámara, dependiente principalmente de la resolución individual de cada hilo, la tolerancia en su paso dentro de una capa y la alineación entre los hilos de las distintas capas en la misma supercapa, ha de ser inferior a $100 \mu\text{m}$. La desalineación entre las supercapas de la misma cámara debe ser inferior a $500 \mu\text{m}$ para obtener señales de tiempo en el trigger. Hay que medir, durante el montaje, con un mínimo de 100 micras de resolución.

La cámara fue sometida a diversas pruebas con el fin de asegurar el cumplimiento de las tolerancias mecánicas de precisión en el posicionado de hilos, para lo cual se utilizó una regla óptica con una cámara CCD de 10 μm de resolución [15]. Se evaluó también la tensión mecánica de los hilos [16]. Su valor nominal (3 N) se encontraba en el límite de la región elástica.

En la figura 5.30, se puede comprobar que los hilos estaban posicionados con una precisión de 50 μm respecto a la posición nominal. Se tuvieron en cuenta las correcciones por diferencias de temperatura entre medidas de una misma capa y medidas en distintas capas. La variación entre dos capas se encontraba entre 0 y 200 μm dependiendo de la posición a lo largo del hilo y de las capas consideradas. Este error sistemático pudo disminuirse con algunas modificaciones de los útiles de pegado de end-lug y vigas.

Se midieron las alturas de las vigas de aluminio, incluyendo los aislantes de lexan, (figura 5.31) y la distribución de la distancia de los electrodos de formación de campo respecto de su posición nominal (figura 5.32). El espesor de cada supercapa fue medido por medio de comparadores con un error de $\pm 0,2$ mm. El espesor global de la cámara se obtuvo con un error de ± 0.45 mm (el espesor incluía las 50 uniones con adhesivo). También fue medida la estanqueidad de la cámara midiendo la contaminación por oxígeno en su interior (30 ppm con las tres capas conectadas en serie y con un flujo de gas de 0.2 l/min).

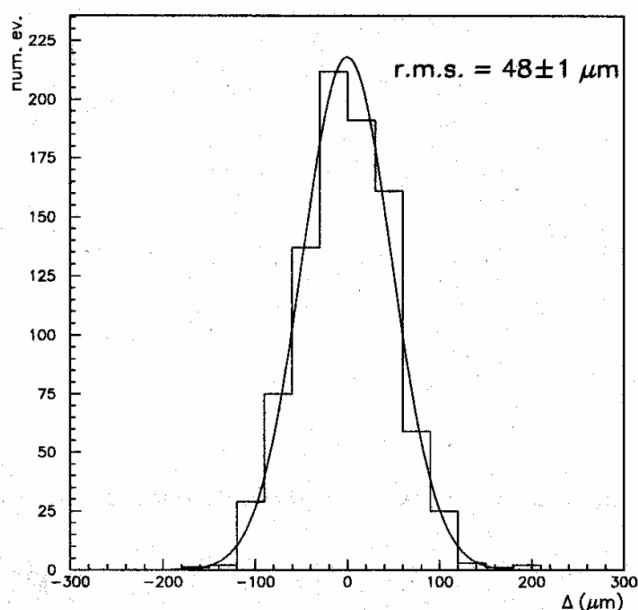


Figura 5.30.- Distribución de las distancias de los hilos a su posición nominal

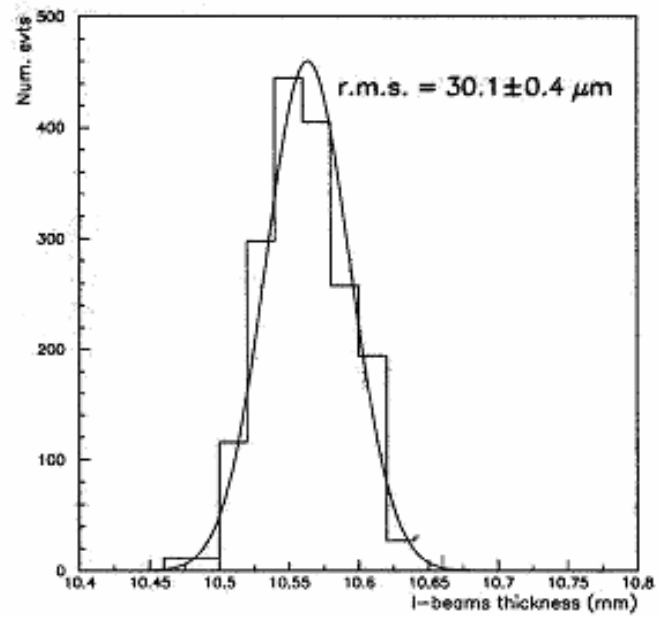


Figura 5.31.- Distribución de las alturas de las vigas con aislante

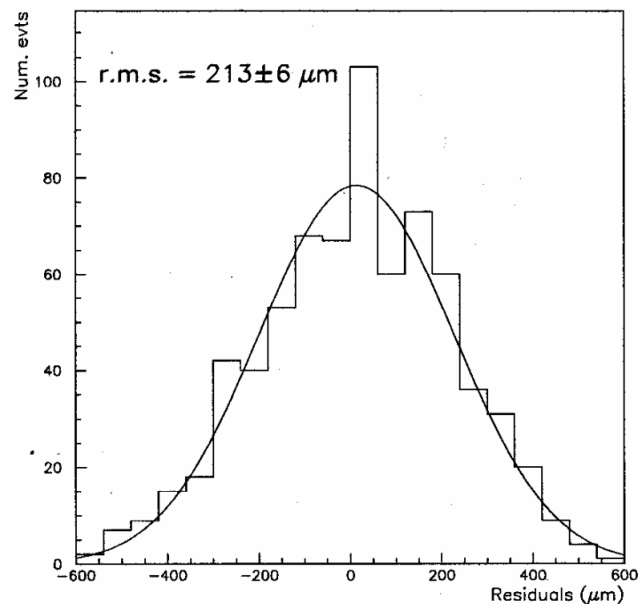


Figura 5.32.- Distribución de la distancia del electrodo a su posición nominal

5.4.- PROTOTIPO FINAL Q4

A finales de 1.988 se incorporaron algunos cambios en el diseño de las cámaras de deriva de CMS [17]. El principal afectó a la configuración de las celdas de deriva (figura 5.33). La modificación más importante fue la nueva configuración de las vigas catódicas. Se suprimieron los aislantes de lexan y se colocaron cátodos de aluminio en ambos lados del alma de las vigas; además, se disminuyó el espesor de las planchas de aluminio que definían las celdas. Estas modificaciones y otras de menor entidad, se describirán con detalle en el capítulo 8.

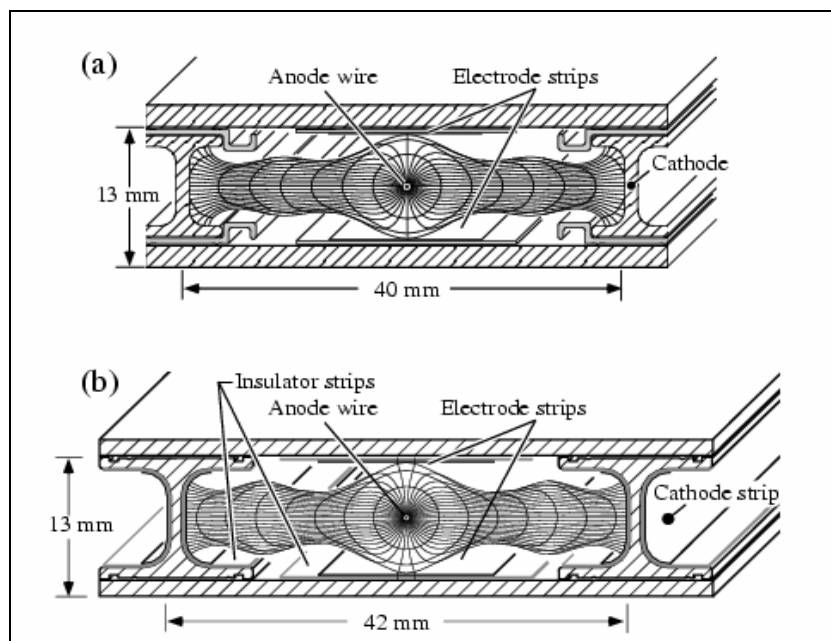


Figura 5.33.- Celdas de deriva original (a) y modificada (b)

Con las nuevas modificaciones se construyó, en 1.999 en el CIEMAT, el prototipo Q4 [18], cuyo objetivo fue validar el nuevo diseño, probar las líneas de fabricación destinadas a la producción en serie de las cámaras de deriva, comprobar las tolerancias en la fabricación (figura 5.34), ajustar los métodos del proceso, ver las necesidades de mano de obra y los tiempos de ejecución, y realizar un mínimo control de calidad en planta y en el haz de muones del CERN.

Q4 era una supercapa tipo MB2 reducida, con sólo 64 hilos de 2.5 m, 16 por capa. En su construcción se emplearon 9 días laborables, cumpliendo con las expectativas

previstas para la fabricación en serie. Por otro lado, se vio la necesidad de limitar a tres el número de operarios necesario para la fabricación, para evitar tiempos muertos e interferencias en las operaciones del proceso.

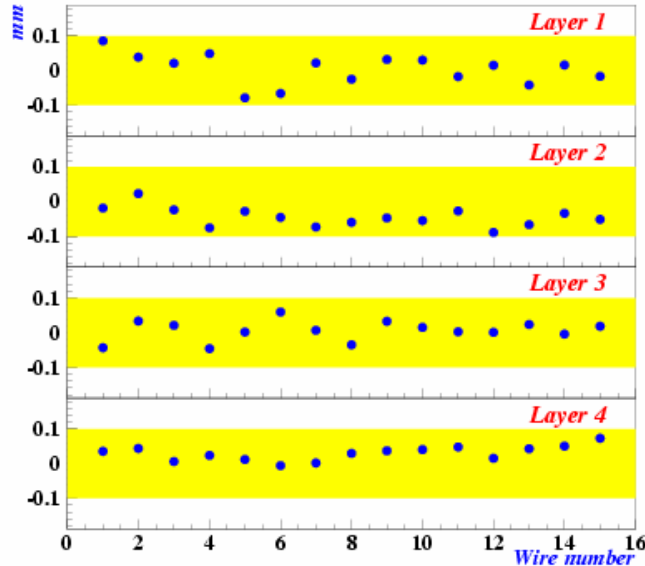


Figura 5.34.- Desviación de la posición nominal de los hilos en Q4

5.5.- CONCLUSIONES

Los prototipos a pequeña escala, MB96 y Q4 se desarrollaron en el marco de un proyecto de investigación y desarrollo de cámaras de deriva, con vistas a la fabricación en serie de las cámaras de muones del detector central del experimento CMS para LHC. El prototipo a escala reducida y Q4 fueron contruidos en el CIEMAT (Madrid) y el MB96 a escala real en el INFN (Legnaro, Padua). El prototipo a escala reducida y MB96 fueron probados de forma exhaustiva en el CERN, sometidos a haces de muones en el Area Norte del SPS (zona H2), durante varios períodos de toma de datos en 1996, 1997 y 1998. Un aspecto fundamental del trabajo consistió en desarrollar los útiles de montaje y los procedimientos de construcción utilizados para la producción en serie de cámaras. Con el prototipo Q4 se comprobaron las líneas de montaje, el tiempo de fabricación, las necesidades de mano de obra, la calidad de los útiles fabricados para la producción en serie.

El prototipo pequeño construido en el CIEMAT cumplió los requisitos mecánicos de posicionado de hilos con la precisión requerida de 100 μm , y superó con éxito las pruebas

de estanqueidad y alta tensión a las que fue sometido. El prototipo MB96 se fabricó con las tolerancias mecánicas requeridas. La fabricación y pruebas realizadas con Q4 en el CIEMAT, fueron el punto de partida de la fabricación de las cámaras de deriva en todos los centros de producción.

REFERENCIAS

- [1] The CMS Collaboration, The Compact Muon Solenoid, Technical Proposal, CERN/LHCC/94-38, LHCC/P1, 15 de Diciembre 1994.
- [2] The CMS Collaboration, The Muon Project, Technical Design Report, CERN/LHCC 97-32, CMS TDR 3, 15 de Diciembre 1997.
- [3] <http://www.intertronics.co.uk/data/ara2012.pdf>
- [4] http://www.datasheetcatalog.net/es/datasheets_pdf/A/D/5/9/AD592AN.shtml
- [5] Transferencia de calor. J. P. Holman. McGraw-Hill, 2002
- [6] <http://wwwae.ciemat.es/cms/>
- [7] Construcción de un prototipo de cámara de deriva para el experimento CMS. M. Daniel, L. Romero et al. Informe Técnico Ciemat 828. Mayo 1997.
- [8] Results obtained with a Drift Chamber Prototype in the CERN H2 test beam area. J. Berdugo et al. Informe Técnico Ciemat 833. Septiembre 1997.
- [9] <http://www.huntsman.com>
- [10] Wire fixation for proportional and drift chambers using a Cu-Te alloy. Bock, R, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 336 (128). 1.993.
- [11] <http://www.actel.com>
- [12] Hewlett Packard's 5528 A Laser Measurement System. User's guide. 1.992.
- [13] SA Modèle 46000 Fuitmètre TC
- [14] Performance and Mechanical Tolerances achieved with a full size prototype of a CMS Barrel Drift Tubes Muon Chamber. M. Aguilar et al., CMS NOTE 15 July 1.998.
- [15] http://www.automatica-elec.es/Elap/El_Pdf/El_KD_KP.pdf
- [16] Single Channel Wire Tension Meter WTM-01. Short manual. Reithler, Hans. III. Physikalisches Institut der RWTH, Aquisgrán. 1.997.
- [17] The CMS Muon Project. Technical Design Report., CERN/LHCC/97-32.
- [18] Construction and Test of the final CMS Barrel Drift Tubes Muon Chamber Prototype. M. Aguilar et al. Nuclear Instruments and Methods A 480, 658. 2.002.

CAPÍTULO 6

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UTILLAJE

6.1.- INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen las tareas realizadas en el diseño y construcción de los útiles necesarios para la fabricación de los prototipos a pequeña escala y a escala real (MB96), así como su descripción y utilización. No se incluyen aquí los útiles empleados en el prototipo Q4, y por tanto en la fabricación en serie, que fueron contruidos en base a los utilizados en los anteriores prototipos, modificando sus dimensiones y mejorando la precisión mecánica de sus componentes, y que se tratarán específicamente en el capítulo 8.

6.2.- ÚTILES PARA LA FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO A PEQUEÑA ESCALA

6.2.1.- DISPENSADOR DE ADHESIVO

El dispensador de adhesivo está constituido por un coordinatógrafo de dos dimensiones, dispositivo automático que permite el desplazamiento de un elemento a lo largo de dos ejes, siendo el elemento que se desplaza el que deposita el adhesivo sobre la superficie a pegar.

El dispensador, que se diseñó y fabricó en el Ciemat (figura 6.1), constaba de un motor de corriente continua que gobernaba el movimiento del elemento móvil (carro) sobre los dos ejes de coordenadas. La transmisión del movimiento del motor al elemento móvil (carro) se realizaba mediante una correa dentada de caucho. Un codificador rotatorio (encoder), acoplado a la correa, determinaba la posición del mismo (cada coordenada) en cada momento.

En un cabezal acoplado al carro móvil, se disponía la mezcla de los dos componentes del adhesivo epoxi (Araldit 2012) [1], dentro de una jeringuilla desechable. El dispensado de

adhesivo se realizaba mediante un tornillo sinfín que accionaba el émbolo de la jeringuilla. El tornillo era movido por un motor con control remoto. La mezcla de los dos componentes del adhesivo y el llenado de la jeringuilla se realizaba, de forma manual, con anterioridad a su implantación en el carro móvil del dispensador.



Figura 6.1.- Dispensador de adhesivo

El sistema de control constaba de un bus VME, un procesador NVME147SA1 insertado en el bus, una tarjeta VME de control con los registros de mando implementados en circuitos FPGA de Actel, y una caja con la electrónica de potencia. Los circuitos FPGA de la tarjeta de control incluían los contadores que controlaban los codificadores y tenían en cuenta la posición del cabezal. También llevaban registros que controlaban la velocidad y sentido de los motores.

El control se realizaba mediante un programa implementado en el procesador VME. Este programa leía la posición del cabezal en unos registros de la tarjeta de control y, de acuerdo con ella, disponía en otros registros de la misma tarjeta la velocidad y sentido de los motores [2].

Para realizar un pegado de vigas o de una plancha, el cabezal realizaba movimientos alternativos (en zig-zag) sobre los lugares donde se adherirían las vigas o la plancha, dispensando cordones de adhesivo en paralelo. Tras el dispensado de un cordón de adhesivo y para dispensar el siguiente, paralelo al anterior, sin que se deposite adhesivo en la trayectoria

transversal en el extremo del cordón, se enmascaraba este trayecto con una cinta desechable de protección que se eliminaba al finalizar el pegado.

6.2.2.- ÚTIL PARA COLOCACIÓN DE VIGAS

La precisión de la posición de los hilos estaba determinada por la precisión en el montaje de las piezas portavigas. El útil de colocación de vigas garantizaba esta precisión [2].

Como se puede ver en la figura 6.2, el útil de montaje o colocación de vigas estaba compuesto por dos piezas (peines) unidas por un puente que además de servir de soporte, fijaba la separación entre las mismas. Los peines sujetaban las piezas situadas en el extremo de las vigas (piezas portavigas). Como se puede ver en el detalle de la figura 6.2 y en la figura 6.3, cada pieza portavigas estaba presionada lateralmente por un fleje de acero contra una fija de 10 mm (10h6), insertada a presión en un taladro de precisión (10H7).

Se puso el máximo cuidado en el mecanizado de estos taladros para obtener la mejor precisión posible en el posicionado de las fijas, consiguiéndose un error inferior a 0.06 mm. El punto de la pieza portavigas que apoyaba en la fija de precisión era el mismo punto donde se apoyaba el portahilos, por lo tanto la precisión del posicionado de las fijas se trasladaba directamente a la posición de los hilos.

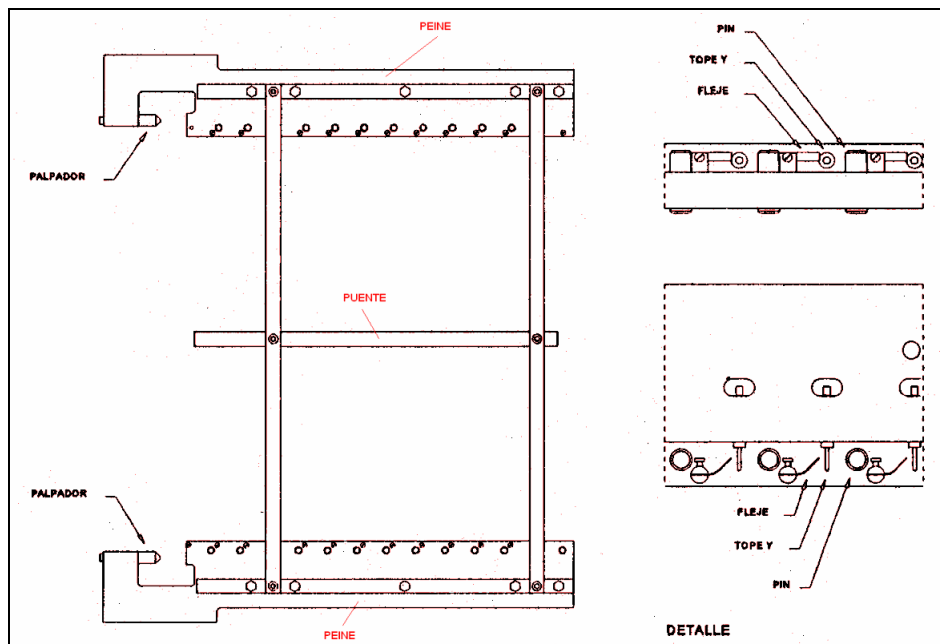


Figura 6.2.- Útil portavigas

Las vigas tenían, una vez colocadas en los peines, un juego de 1 mm. Para minimizar el error transversal de posicionado de las mismas, un tope con muelle oculto en el peine opuesto a la referencia Y, empujaba cada viga contra el fondo del peine del lado de referencia.

El posicionado vertical de las vigas se realizaba mediante los topes verticales de los peines y mediante la pletina soporte central. Las diferentes alturas de montaje para las diversas capas se lograban insertando separadores entre los peines y la mesa de montaje.

Dos palpadores en el extremo de los peines apoyan en la referencia externa de la supercapa para situar globalmente las vigas (figura 3).

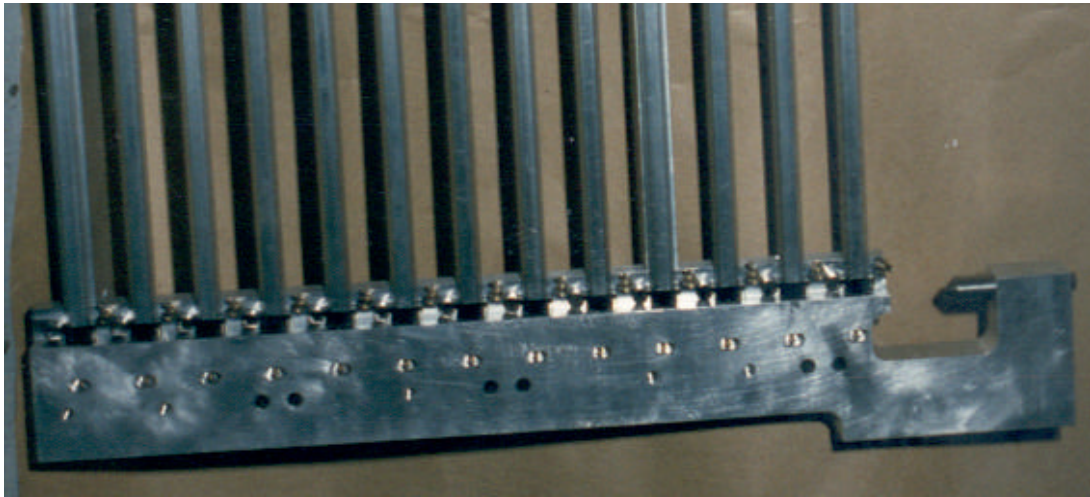


Figura 6.3.- Detalle del útil portavigas

Había dos juegos de palpadores con una diferencia de longitud de 20 mm, para poder montar capas alternadas de vigas (figuras 6.4 y 6.5).

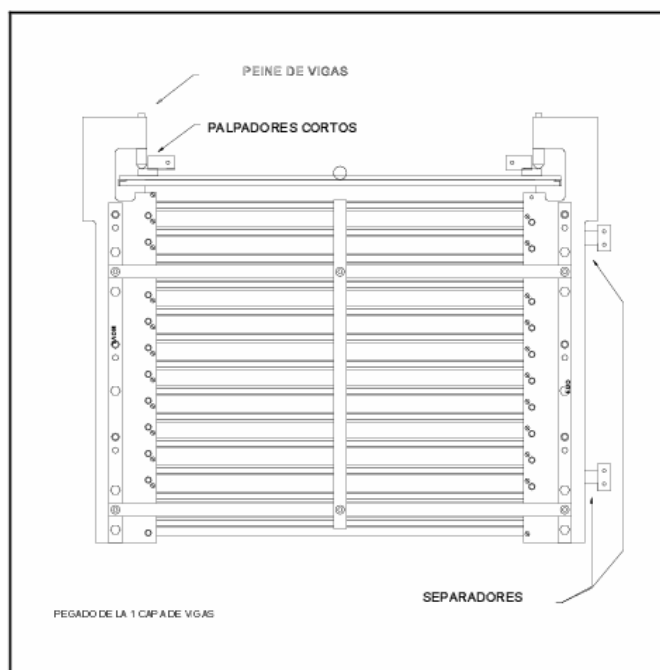


Figura 6.4.- Pegado de la primera capa de vigas de una supercapa

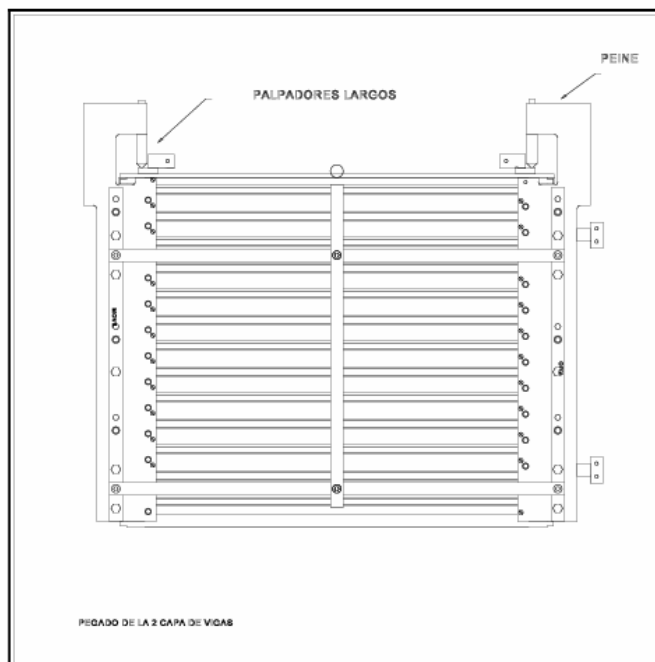


Figura 6.5.- Pegado de la segunda capa de vigas de una supercapa

6.3.- ÚTILES EMPLEADOS EN EL PROTOTIPO A ESCALA REAL (MB96)

6.3.1.- DISPOSITIVO PARA EL POSICIONADO Y DISPENSADO DE ELECTRODOS

Este dispositivo, instalado en un coordinatógrafo (figura 6.6), permite el dispensado y colocación automática de los electrodos conformadores de campo de MB96 en las 24 caras de las planchas de aluminio que, junto con las vigas y los hilos, constituyen las celdas que la conforman, garantizando su correcto posicionamiento. El dispensado y colocación de los electrodos en las planchas se realiza sobre la superficie de la mesa de precisión, donde se montan las supercapas de la cámara.

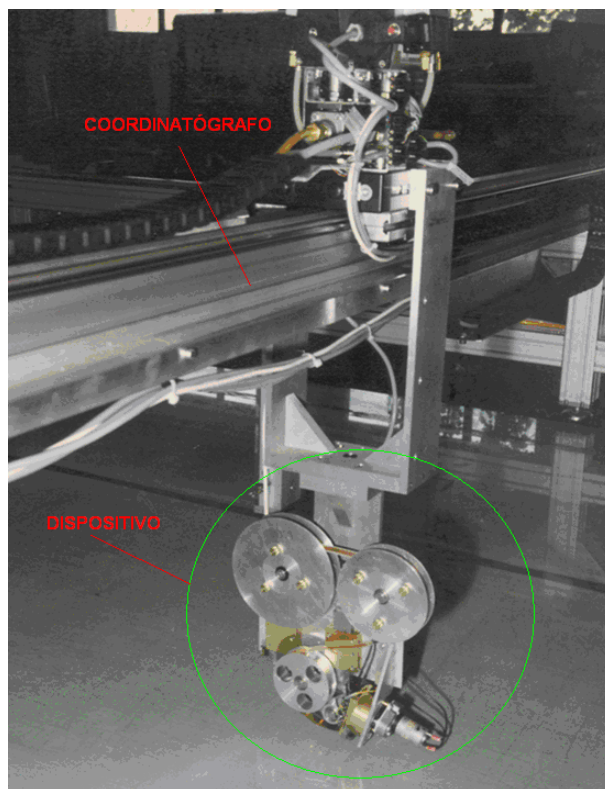


Figura 6.6.- Dispositivo para el posicionado y dispensado de electrodos

Para ello, este dispositivo despegaba el papel protector de la cinta del electrodo y lo almacenaba. A continuación colocaba y tendía el electrodo sobre la plancha de aluminio y, por último, cortaba el electrodo a la longitud deseada (figuras 6.7 y 6.8). Todo ello de una forma totalmente automática y sin intervención alguna de operarios.

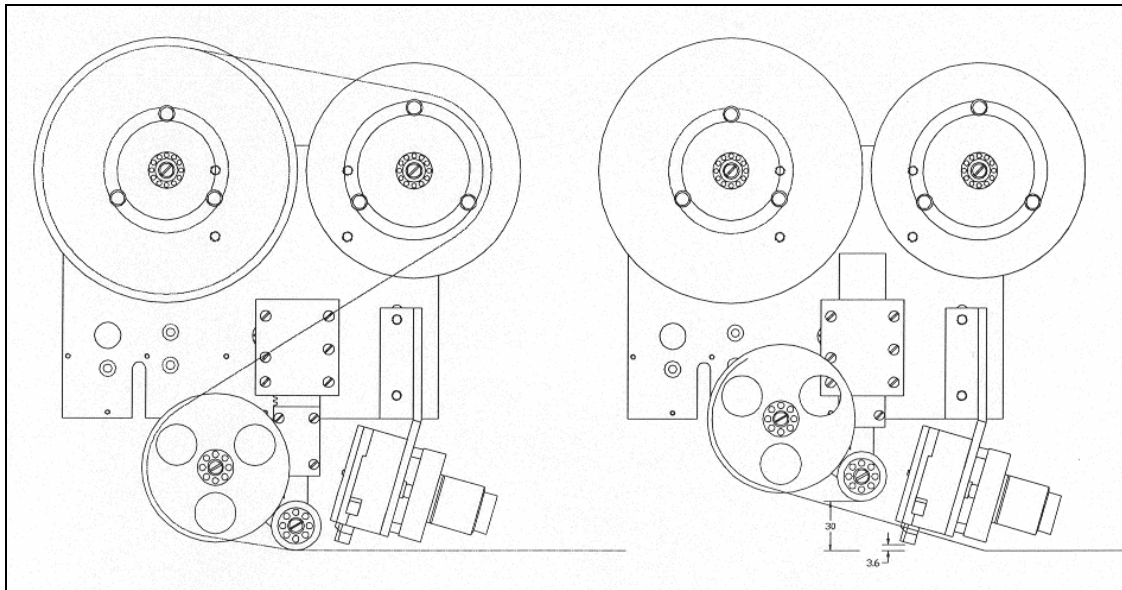


Figura 6.7.- Esquema de la operación de corte de electrodos

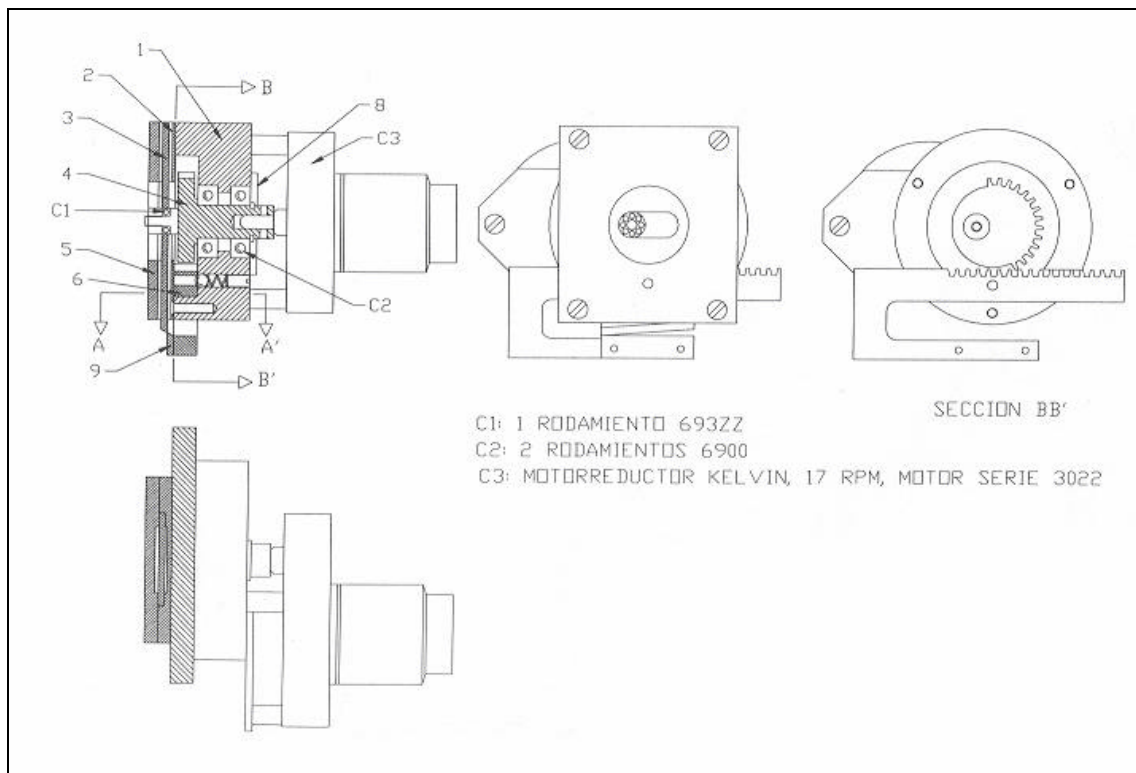


Figura 6.8.- Detalle del cortador de electrodos

La colocación y dispensado de los electrodos sobre las planchas de aluminio se realizaba previamente al montaje de la cámara, para evitar interferencias en el proceso de fabricación. La posición de los electrodos fue medida a dos alturas diferentes. La precisión en el posicionamiento de los mismos fue de ± 0.5 mm, cumpliendo los requerimientos CMS [3].

6.3.2.- DISPENSADOR DE ADHESIVO

6.3.2.1.- DESCRIPCIÓN

El dispensador de adhesivo (figura 6.9) va instalado también en un coordinatógrafo (figura 6.10). El adhesivo utilizado en la construcción del prototipo es Araldit 2012 [1]. Este adhesivo epoxi consta de dos componentes que se han de mezclar íntimamente para obtener una fuerte adhesión. El diagrama de flujo del dispensador está representado en la figura 6.11.

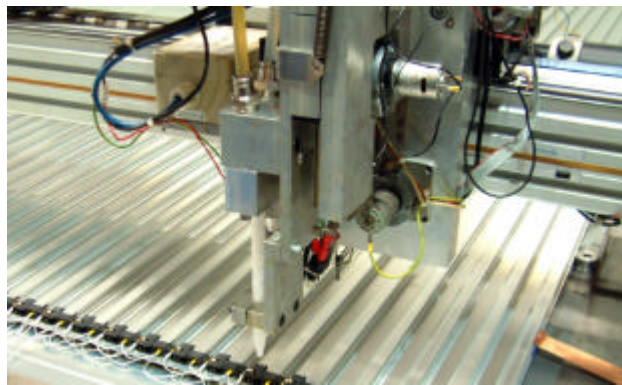


Figura 6.9.- Dispensador de adhesivo



Figura 6.10.- Coordinatógrafo con el dispositivo dispensador de adhesivo

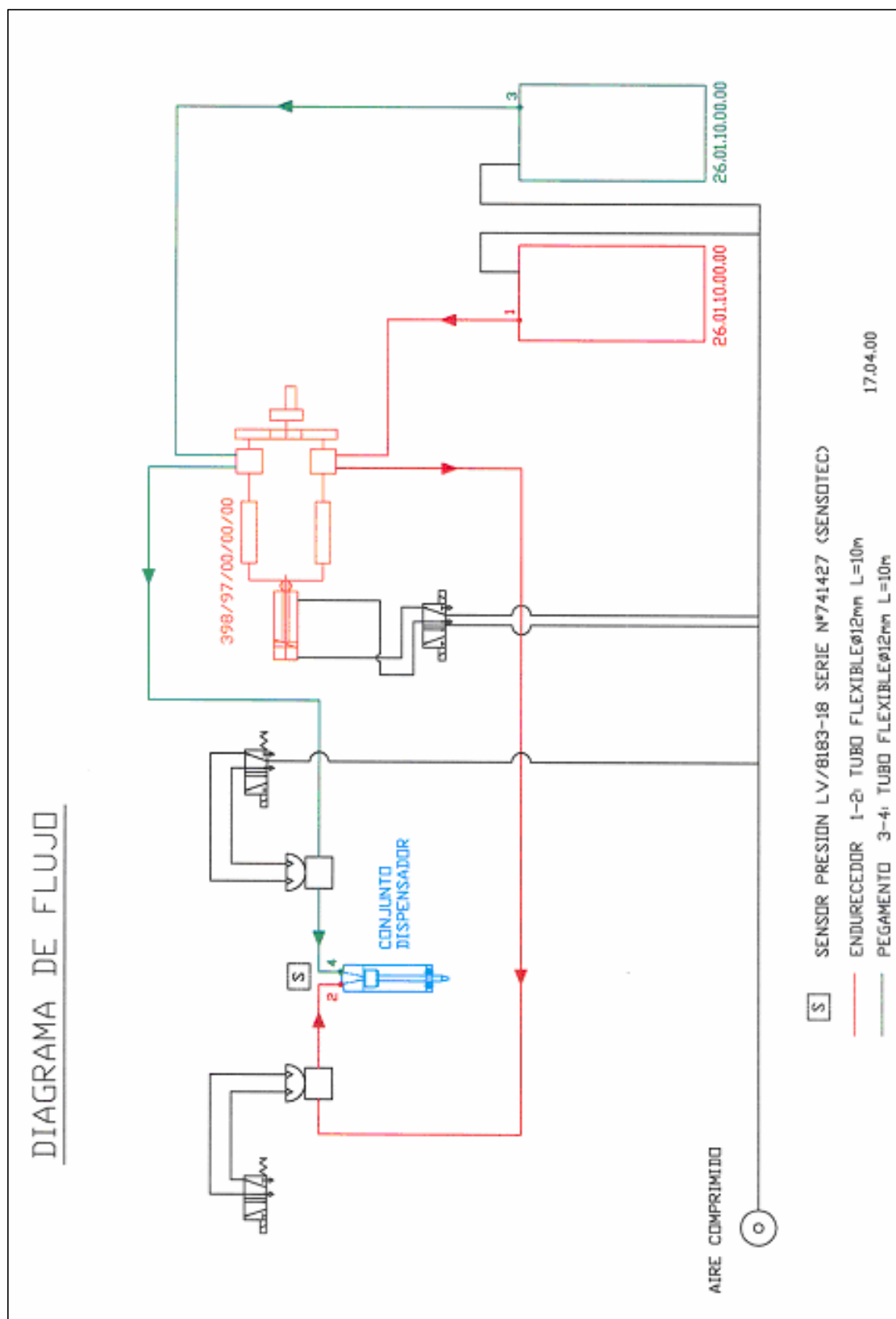


Figura 6.11.- Diagrama de detalle del dispensador de adhesivo

Un cilindro neumático [4] de doble efecto, accionado por aire comprimido, actúa sobre los émbolos de dos pequeños cilindros (figura 6.12), impulsando los dos componentes del adhesivo desde los depósitos (figura 6.13) hasta el cabezal mezclador (figura 6.14), con una fuerza igual a la presión del aire comprimido multiplicada por la razón de las superficies de los émbolos de los cilindros pequeños y del cilindro de doble efecto [5,6].

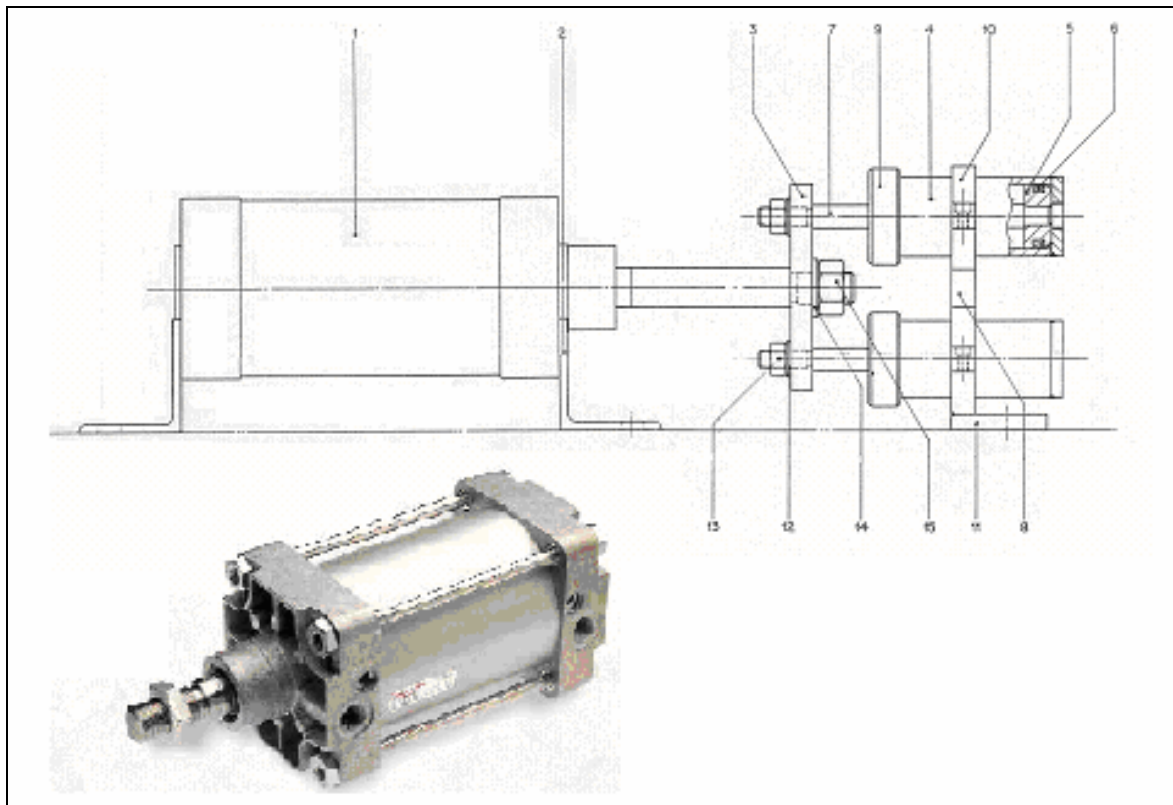


Figura 6.12.- Actuador neumático

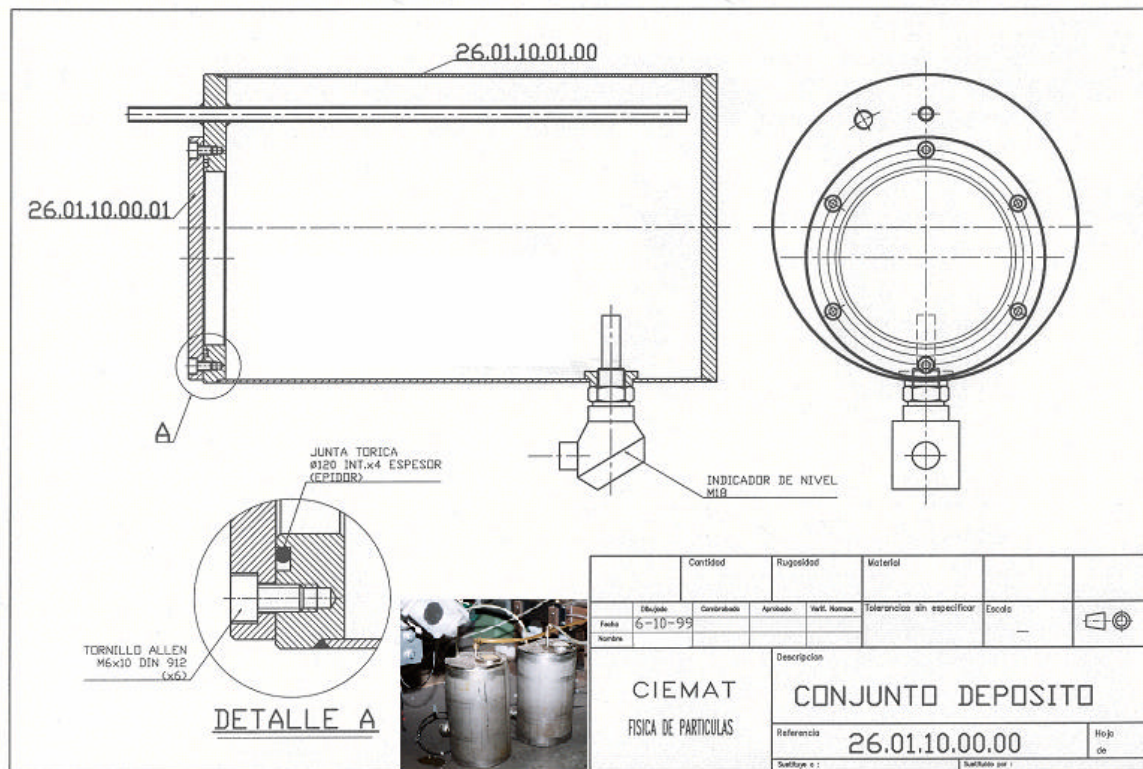


Figura 6.13.- Depósito para cada componente del adhesivo

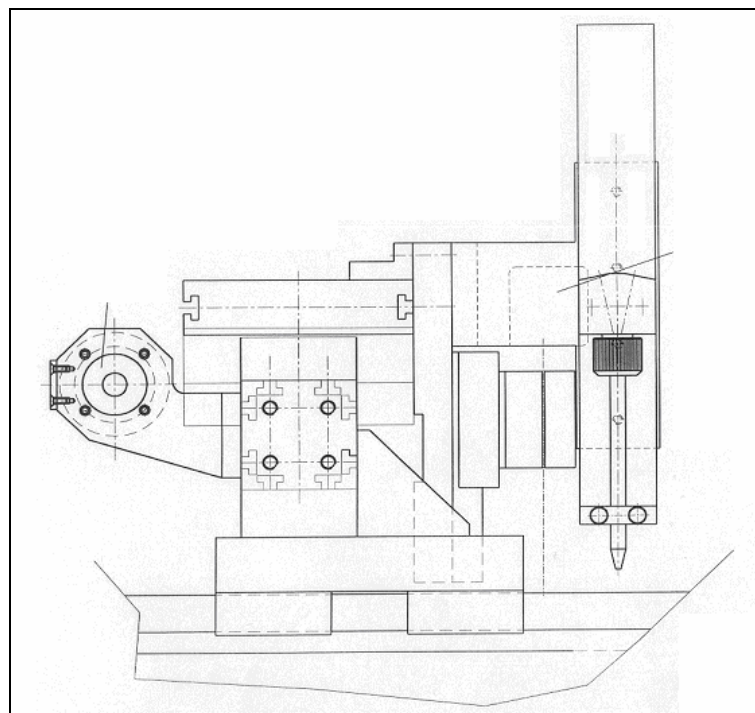


Figura 6.14.- Detalle del mezclador de adhesivo

Regulando la presión del aire comprimido, se controlaba el flujo del adhesivo. Cambiando la posición de las válvulas y el sentido del émbolo del cilindro de doble efecto, los cilindros pequeños se volvían a llenar con sus respectivos componentes. Dos válvulas en el cabezal, accionadas por aire comprimido bajo control remoto por ordenador, interrumpían el flujo de los componentes del adhesivo.

6.3.2.2.- CALIBRACIÓN

Para calibrar el dispensador era necesario estudiar los parámetros esenciales para el correcto funcionamiento del dispositivo: Flujo, presión de trabajo e influencia de la temperatura.

- FLUJO DE ADHESIVO

La velocidad lineal del mezclador, que proporcionaba un motor de corriente continua instalado en el coordinatógrafo a 150 rpm, era $v = 26 \text{ m /min.}$; teniendo en cuenta que el cordón de adhesivo dispensado debía ser uniforme, suponiéndolo cilíndrico, y que la salida del adhesivo era a través de una cánula con una sección circular de salida de 1mm de diámetro, se obtuvo que un metro de cordón (sección $A = 0.78 \text{ mm}^2$) equivale a 780 mm^3 de adhesivo a la temperatura de 22°C .

Para mantener la uniformidad del cordón en todo su recorrido se aplicó la ecuación de la continuidad, obteniéndose el flujo de adhesivo necesario:

$$q = A \cdot v = 20.3 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \quad (6.1)$$

- PRESIÓN DE TRABAJO

Es la presión necesaria, considerando una temperatura de trabajo de 22°C , para que un cilindro neumático impulse a los dos componentes del adhesivo y se obtenga en la boquilla del dispensador un cordón con las características descritas anteriormente.

Empleando la analogía eléctrica, se calculó esta presión P_T a partir de la expresión:

$$P_T = P_{min} + P_I \quad (6.2) \quad \text{donde:}$$

$P_{min} = 0.6 \text{ bar}$, presión mínima de funcionamiento del cilindro neumático

P_I = Presión de impulsión del adhesivo dada por:

$$P_I = q \cdot R_I \quad (6.3) \quad \text{donde:}$$

q = Flujo del adhesivo, obtenido en (6.1)

R_I = Resistencia del tubo y mezclador al paso del adhesivo

Para obtener R_I , se dispuso una cabeza mezcladora alimentada con dos conductos, uno para cada componente del adhesivo. Los conductos eran de tubo flexible de nylon de 2 m de longitud y 10 mm de diámetro interior, conectados al actuador neumático.

Experimentalmente se elaboró la gráfica de la figura 6.15, de la que se obtuvieron las relaciones caudal-presión para los conductos, por una parte, y para los conductos con el mezclador, por otra. Los valores inversos de estas relaciones son las resistencias al paso del adhesivo.

Así la resistencia por metro lineal de tubo resultó ser de $0.013 \text{ bar/cm}^3/\text{min}$, es decir, la mitad del inverso de $38.4 \text{ cm}^3/\text{min}/\text{bar}$ ($0.026 \text{ bar/cm}^3/\text{min}$). La resistencia del conjunto tubo-mezclador sería el inverso de $13 \text{ cm}^3/\text{min}/\text{bar}$ ($0.077 \text{ bar/cm}^3/\text{min}$). La resistencia del mezclador se halló restando esta última de la del tubo de 2m de longitud, obteniéndose un valor de $0.051 \text{ bar/cm}^3/\text{min}$.

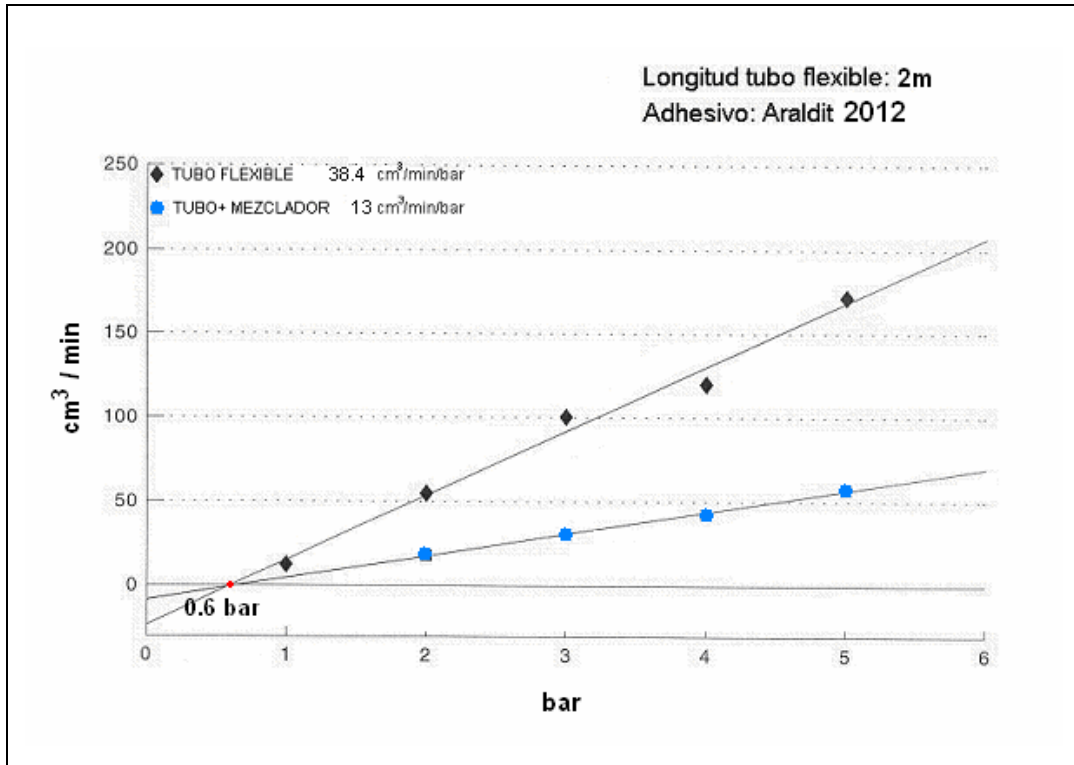


Figura 6.15.- Flujo de adhesivo

Para el dispensador de adhesivo se utilizaron conductos, de las mismas características y 8 m de longitud, y un mezclador; por lo que la resistencia R_t es la suma de la resistencia del tubo de 8 m y la del mezclador:

$$R_t = 0.104 + 0.051 = 0.155 \text{ bar/cm}^3/\text{min} \quad (6.4)$$

Substituyendo en (6.3) se obtuvo el valor $P_t = 3.15$ bar. Reemplazando este valor en (6.2) se calculó la presión de trabajo:

$$P_T = 3.8 \text{ bar}$$

Teniendo en cuenta que la presión suministrada por la instalación de aire comprimido se encontraba en un rango de $0 \div 7$ bar, se pudo regular con un manorreductor controlado por ordenador, manteniéndola en 4 bar.

- INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

La viscosidad del adhesivo varía linealmente con la temperatura. A menor temperatura, mayor viscosidad. Por lo tanto, es necesario un aumento de la presión de trabajo para obtener el cordón de adhesivo deseado cuando disminuya la temperatura y viceversa.

La temperatura de trabajo estuvo controlada a 22 ± 2 °C. Experimentalmente, se obtuvo la gráfica de la figura 6.16, que refleja la relación entre el flujo de adhesivo dispensado y la temperatura ambiente existente en el recinto en dos instantes, separados cuatro horas entre sí, sin control de temperatura.

La presión de trabajo P_T , en el caso más desfavorable (20 °C), tendría que incrementarse de acuerdo a los valores obtenidos en las figuras 6.14 y 6.15 en 2,7 bar, siendo necesaria una presión de trabajo de 6.5 bar, inferior a la máxima disponible en la instalación de aire comprimido (7 bar). Por lo tanto, el dispensado de adhesivo no tuvo que interrumpirse en todo el período de producción.

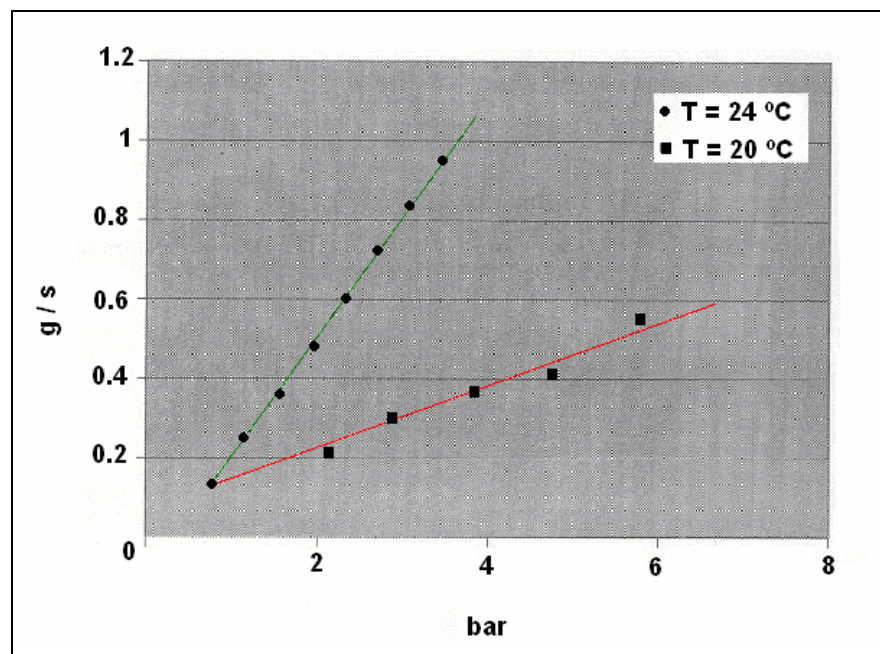


Figura 6.16.- Flujo de adhesivo a 20°C y a 24°C

6.3.3.- COORDINATÓGRAFOS

Los coordinatógrafos eran las estructuras que soportaban y sobre las que se desplazaban, tanto el cabezal dispensador de adhesivo como el cabezal posicionador y dispensador de electrodos (figura 6.18). Cada coordinatógrafo estaba constituido, básicamente, por una estructura de tres perfiles de aluminio anodizado, tipo Bosch o similar, de 90 x 90 mm reforzado [7,8]. Dos de estos perfiles laterales eran paralelos y el otro transversal; uno de los perfiles laterales y el transversal tenían guías lineales independientes motorizadas [12].



Figura 6.18.- Coordinatógrafo instalado sobre una mesa de precisión de vidrio

Los coordinatógrafos se ajustaban a las dimensiones de la mesa de precisión sobre la que se instalaban. El perfil transversal se deslizaba sobre dos carriles guía y dos carros estándar [7] a lo largo de los perfiles laterales. El desplazamiento se realizaba por medio de dos correas dentadas situadas en dichos perfiles. Estas correas eran solidarias al eje de la guía lineal lateral a través de reenvíos angulares [9], que eran accionados por un servomotor de corriente continua (figura 6.19, 6.20 y 6.21).

Sobre el perfil transversal se deslizaba, a través de un carril-guía y un carro estándar, el cabezal, también accionado por un motor de corriente continua [10], a través de otra correa dentada. Dos codificadores giratorios (encoders) [11] acoplados a los ejes, permitían la determinación de la posición del cabezal del coordinatógrafo en cada instante. Esta posición podía ser leída por un ordenador, que controlaba la velocidad y sentido de giro de los motores de corriente continua.

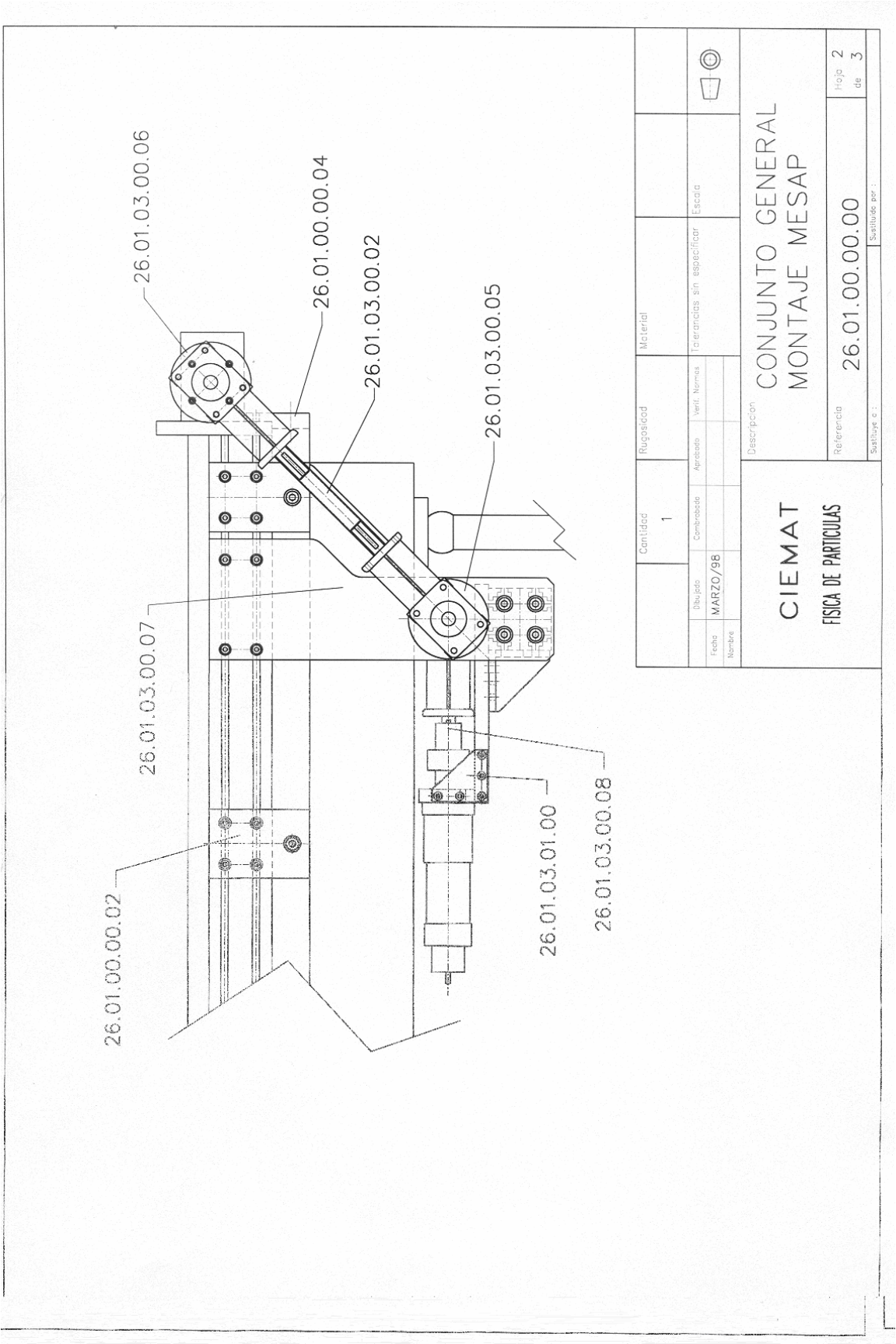


Figura 6.19.- Detalle de esquina de un coordinatógrafo con reenvío y motor

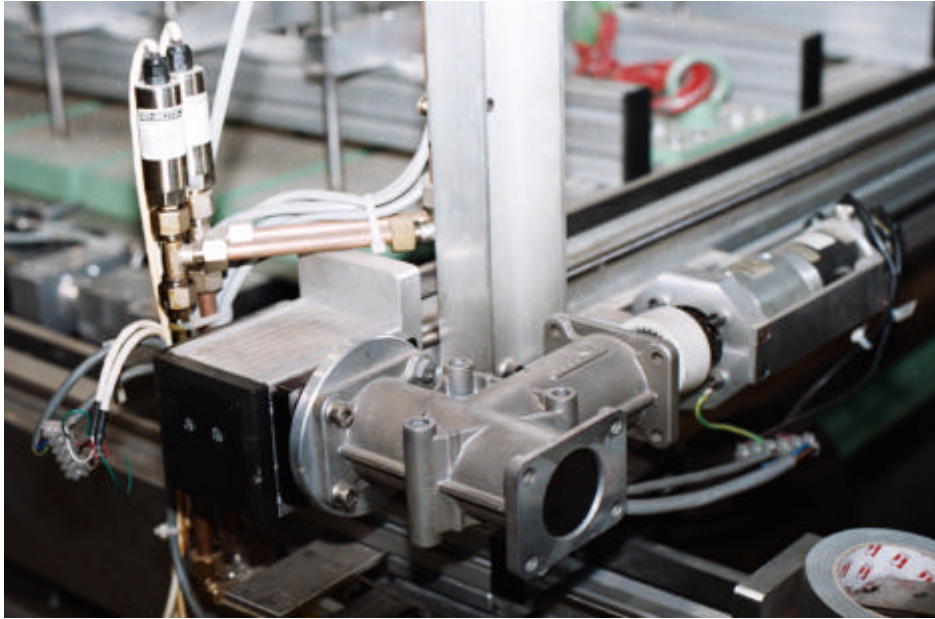


Figura 6.20.- Coordinatógrafo con reenvío, motor y regulador de presión

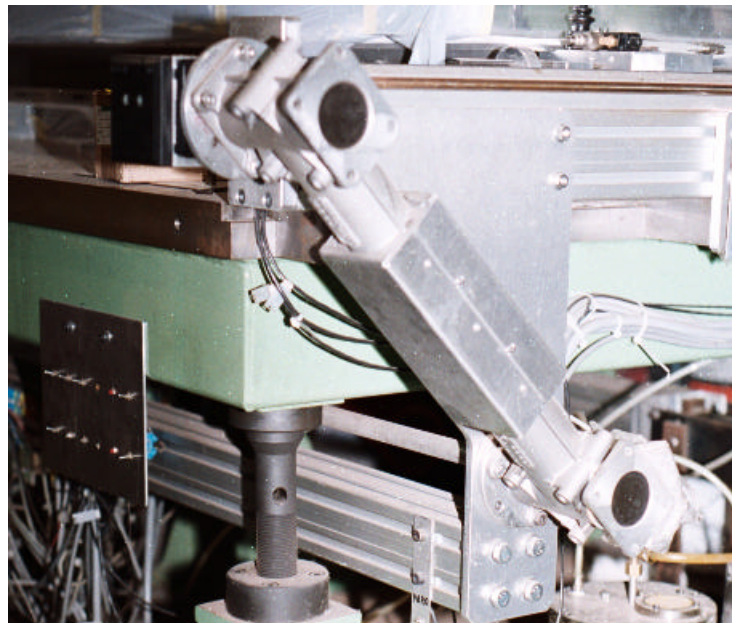


Figura 6.21.- Detalle de reenvío de un coordinatógrafo

La figura 6.22 es un dibujo de conjunto de un coordinatógrafo con un dispensador de adhesivo, instalado en una mesa de precisión.

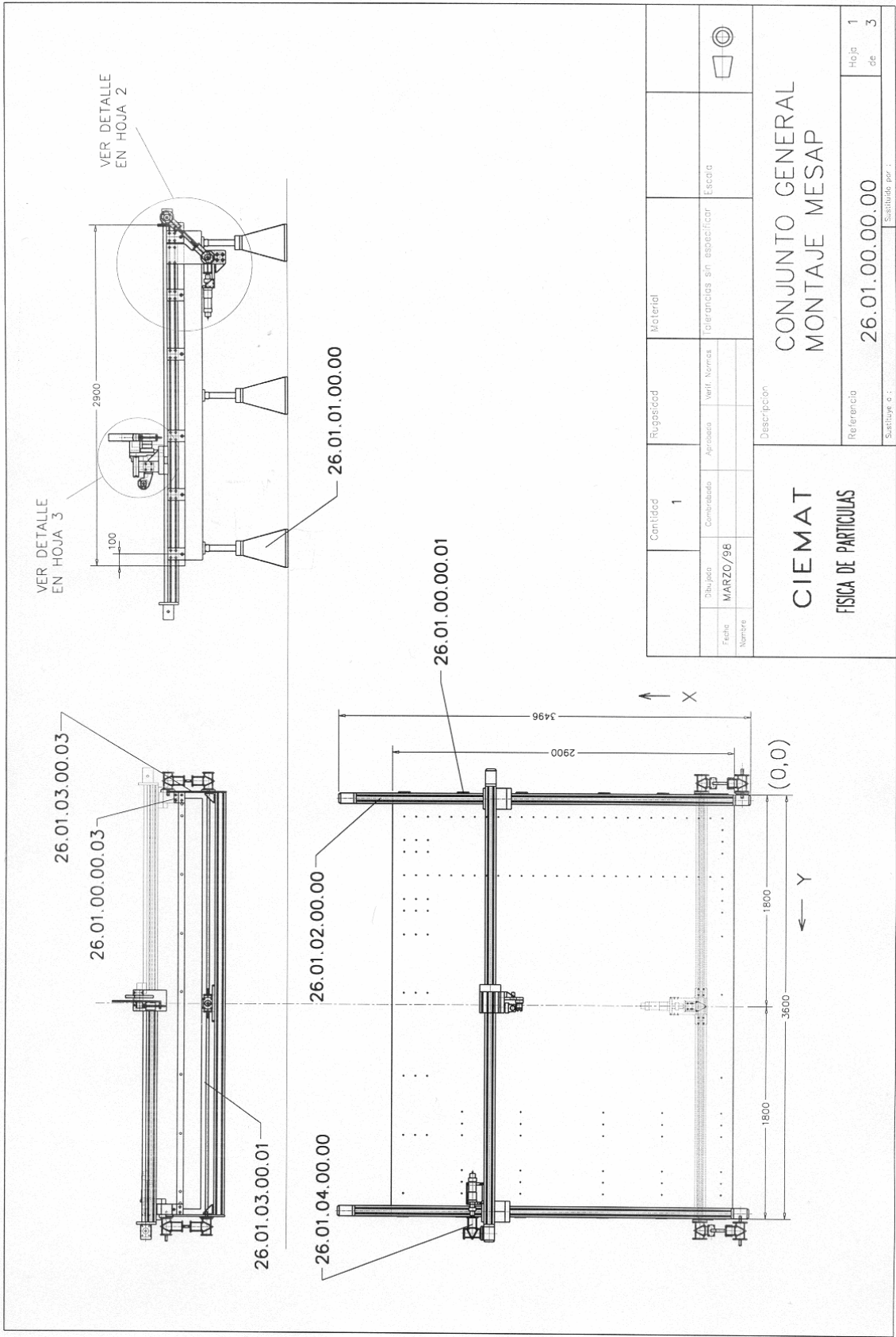


Figura 6.22.- Dibujo de conjunto de un coordinatógrafo instalado en una mesa de precisión

6.3.3.1.- SISTEMA DE CONTROL

Para el control por ordenador de los coordinatógrafos se diseñaron y realizaron tres tarjetas electrónicas:

- Una tarjeta de potencia, para el accionamiento de los motores de corriente continua de hasta 24V y 12 A.
- Una tarjeta de control de los motores, con capacidad de controlar la velocidad y el sentido, así como los codificadores para registrar posiciones.
- Una tarjeta de interfaz VME, para permitir el acceso del ordenador a las tarjetas de control.

REFERENCIAS

- [1] <http://www.huntsman.com>
- [2] Construcción de un prototipo de cámara de deriva para el experimento CMS. M. Daniel, L. Romero et al. Informe Técnico Ciemat 828. Mayo 1997.
- [3] The Barrel Muon Chamber of the CMS Experiment: Recent Results. E. Torassa. 1.997.
- [4] http://www.norgren.com/document_resources/ES/es_p58_103.pdf
- [5] Aplicaciones de la neumática en fabricación, manipulación y montaje. José Luis Borrego y Manuel Domínguez. UNED. 1.996.
- [6] Automatización neumática y electroneumática. Salvador Millán. Marcombo.1.995
- [7] http://www.boschrexroth.com/country_units/europe/spain/es/catalogos_de_producto
- [8] <http://www.nikaisl.com/index.php>
- [9] http://www.trame.es/reenvíos_angulares.htm
- [10] http://www.parvex.com/products/servomoteurs_dc_serie_rs.htm
- [11] <http://www.hohner.es/de/increm/increm2.htm>
- [12] http://www.schaeffler.es/content.schaeffler.es/es/ina_fag_products

CAPÍTULO 7

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y VERIFICACIÓN DE MESAS DE PRECISIÓN

7.1.- INTRODUCCIÓN

Las cámaras de deriva son estructuras de aluminio, modulares y planas de gran tamaño (2.5 m x 2.5 m x 0.3 m), formadas por 2 ó 3 supercapas de espesor medio 60 mm y un elemento rigidizador de espesor 130 mm, con estructura interior en panal de abeja (honeycomb), unidas con adhesivo (araldit 2012). (Figura 7.1)

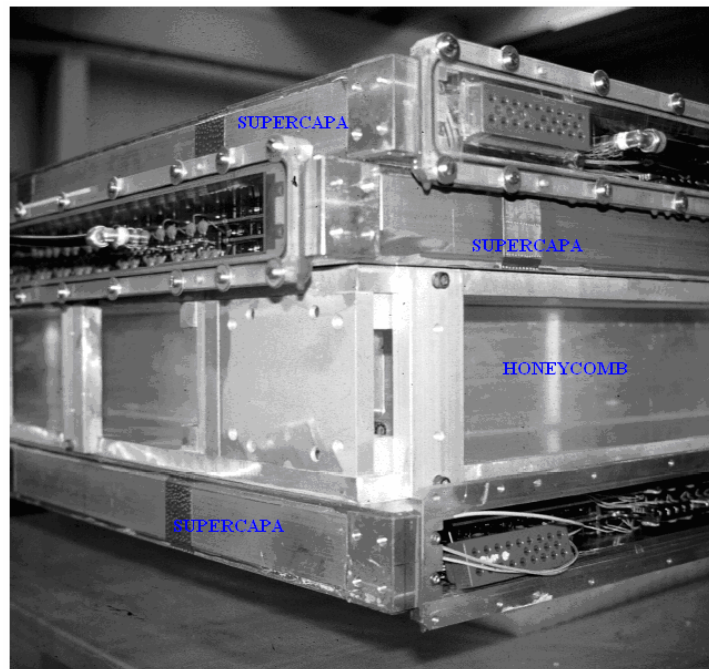


Figura 7.1.- Estructura de una cámara de deriva

Cada una de las supercapas está constituida por cuatro capas apiladas de celdas de deriva adyacentes, unidas también con adhesivo, colocadas de forma que las celdas de una

capa en relación con las de la capa o capas en contacto con ella estén desplazadas horizontalmente la longitud de media celda (figura 7.2), para obviar la ambigüedad izquierda-derecha.

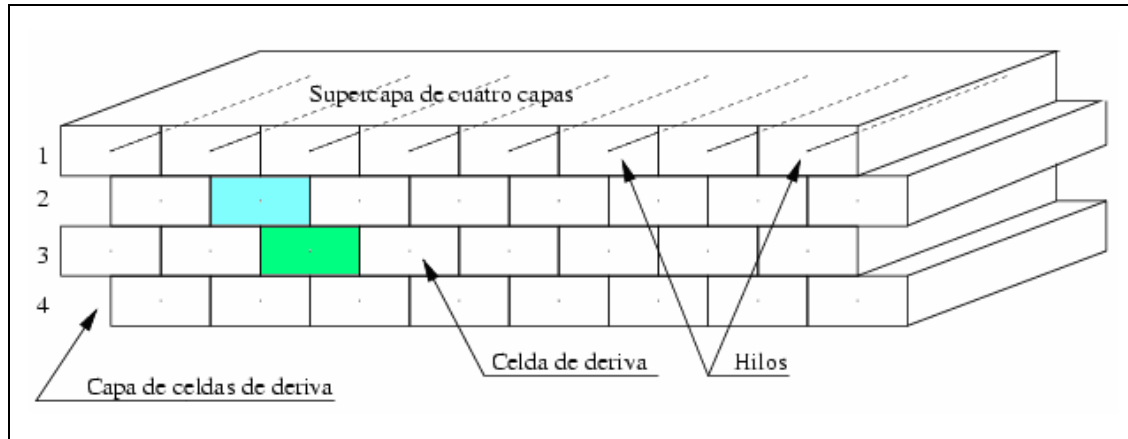


Figura 7.2.- Esquema de una supercapa de cuatro capas colocadas al tresbolillo

7.2.- NECESIDAD DE UNA MESA DE PRECISIÓN: TOLERANCIA ADMISIBLE EN PLANITUD Y CENTRADO

El parámetro fundamental de las celdas de deriva es el centrado del hilo anódico respecto a cada celda, parámetro necesario para su correcto funcionamiento como hilo detector [1]. La flecha del hilo debe tener como valor máximo permitido aquel que no produzca una descarga con alguna de las planchas o electrodos que lo delimitan, y que no altere apreciablemente la ganancia gaseosa de la celda, que está directamente relacionada con la avalancha de electrones producidos por las ionizaciones de las partículas que la atraviesan [2].

Las simulaciones, realizadas en el RTWH de Aquisgrán, determinaron que la influencia en la ganancia del desplazamiento del hilo anódico respecto al centro geométrico de la celda, del electrodo central, del electrodo central y plancha superior de la celda, del electrodo principal, y de la deformación vertical de los dos planos de masa, era la indicada en la figura 7.3. La deformación de las dos planchas implica una disminución del espesor de la celda, equivalente a una doble reducción de la distancia del hilo a una de las planchas.

Admitiendo que la ganancia relativa deseable ha de ser la máxima posible, y que ésta no debe reducirse más del 20% de su valor en una celda ideal para el correcto funcionamiento de la misma [3], a la vista de la figura 3, se deduce que es aceptable una tolerancia general en el posicionado de estos elementos que constituyen las celdas de deriva, de 500 μm .

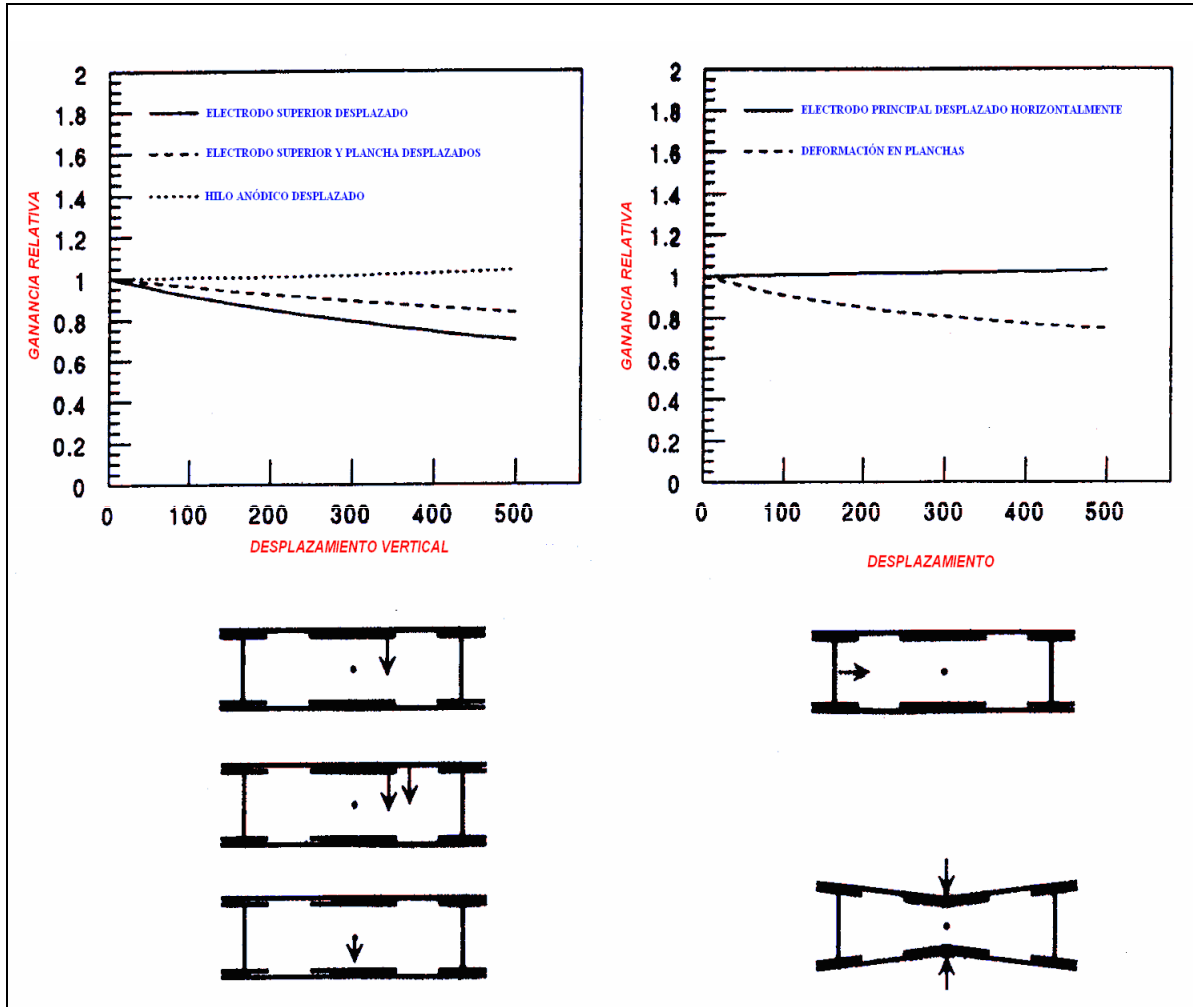


Figura 7.3.- Variación de la ganancia con el desplazamiento de elementos de la celda

Para obtener estas tolerancias es preciso fabricar las capas y supercapas de las cámaras de deriva sobre una superficie de trabajo con la mayor planitud posible; esta planitud es fundamental para el ensamblaje de las cámaras. En el ensamblaje, el elemento rigidizador es el que garantiza la planitud a los demás módulos que la componen

(supercapas). Los rigidizadores (honeycomb) están fabricados (Hexcel) con una tolerancia en su espesor de ± 0.5 mm y una planitud = 1 mm en ambas caras [4].

Por tanto, un elemento fundamental en el proceso de fabricación de las cámaras de deriva es la elección de un banco de montaje o mesa de precisión con una superficie de planitud inferior a 1 mm.

El apilamiento de los distintos elementos de las cámaras se realiza por pegado con adhesivo. El adhesivo (araldit 2012) absorbe las posibles irregularidades transmitidas por pequeñas imperfecciones de la mesa (≤ 0.2 mm), así como las de las distintas supercapas, y permite el control del espesor total de cada cámara.

7.3.- REQUISITOS DE LA MESA

Entre las posibles opciones a emplear como superficies de las mesas de montaje, se descartaron las siguientes:

- Una superficie de mármol, como la empleada para el montaje del prototipo a escala reducida, por el tamaño requerido para las cámaras a fabricar y por la difícil mecanización de su superficie.
- Una superficie de vidrio, como las empleadas en la fabricación de cámaras Z para el experimento L3, por tener que apoyarse en otra superficie (a la cual reproduce) y por su fragilidad frente a impactos con los útiles y elementos auxiliares de montaje (en la fabricación artesanal terminó por quebrarse en parte).
- Una superficie de aluminio, por su excesivo coste.

La única alternativa factible fue la de una superficie de acero laminado, de fácil mecanización, similar a la empleada en la fabricación del prototipo MB96 en el INFN de Legnaro, que estaba constituida por dos piezas atornilladas, debido a la dificultad de transporte a su lugar de ubicación. En nuestro caso, se decidió disponer de una mesa similar, preferentemente de una sola pieza, para mejorar la planitud y facilitar su nivelación in situ. Su mayor inconveniente sería la oxidación de su superficie.

7.4.- DISEÑO DE LA MESA

La mesa estaba formada por una superficie plana y una estructura que la soportaba.

7.4.1.- SUPERFICIE PLANA

Las piezas de mayor tamaño que se manejarían en la mesa de montaje, serían planchas de dimensiones 2500 x 2500 x 1,5 mm. La superficie de trabajo disponible debería ser mayor, para permitir su manipulación y la utilización de útiles para la fabricación de las cámaras.

Se eligió una única plancha de acero laminado, de 5 T de 2.900 x 3600 x 50 mm, rigidizada con tubo cuadrado de acero, de 150 mm de lado y 5 mm de espesor, soldado a la misma. Su coste era asequible, en comparación con la superficie de aluminio, y además una mesa con una superficie similar estaba ya operativa en el INFN de Legnaro, habiéndose construido, dentro de tolerancias, el prototipo a tamaño real MB96 [5].

Las superficie superior y laterales de la plancha se mecanizaron en una fresadora puente (figura 7.4). Ambas superficies tendrían una planitud de 0.2 mm y una rugosidad N9.



Figura 7.4.- Fresadora puente Forest de 6.500 x 2.900 x 1.000 mm

Dispondrían de taladros para la posible colocación de útiles y elementos de referencia para la construcción. En la superficie superior se realizaron 120 taladros pasantes especiales: 10H7 en su mitad superior, para pasadores cilíndricos, y roscados a M8 en su mitad inferior, para posible fijación con tornillos.

La tolerancia de posición de los ejes de los taladros sería mejor que 0.1 mm, siendo accesoria la parte roscada. En sus superficies laterales se distribuirían 30 taladros roscados 30 mm de M12, por si fuera necesaria su utilización (figura 7.5).

7.4.2.- DISPOSITIVO SOPORTE

La plancha estaría soportada por un conjunto de gatos elevadores (figuras 7.6 y 7.7) de elevada capacidad de carga, para lograr un posicionamiento horizontal muy preciso de la mesa (< 0.1 mm). De acuerdo con la experiencia adquirida en la fabricación del prototipo MB96, se colocaron 11 gatos distribuidos longitudinalmente en tres grupos (3-5-3), como se indica en la figura 7.8.

Estos gatos permitieron una nivelación de la mesa utilizada, con un error de 0.05 mm/m, nivelación comprobada por un inclinómetro Wyler de la misma precisión (figura 7.9). Cada gato tendría una capacidad de carga de, al menos, 2 T; una longitud mínima de 500 mm; un recorrido de 100 mm; y una base de apoyo en la solera de, al menos, 100×100 mm².

El apoyo en la estructura rigidizadora de la mesa sería esférico, con un error de posicionado menor que 0,1 mm. La carga máxima estimada en el proceso de producción en una mesa sobre los gatos, incluiría: el peso de la plancha y el tubo rigidizador (6 T), el peso de una cámara montada (1 T) y el útil de pegado de la última supercapa (2 T); en total 8.5 T.

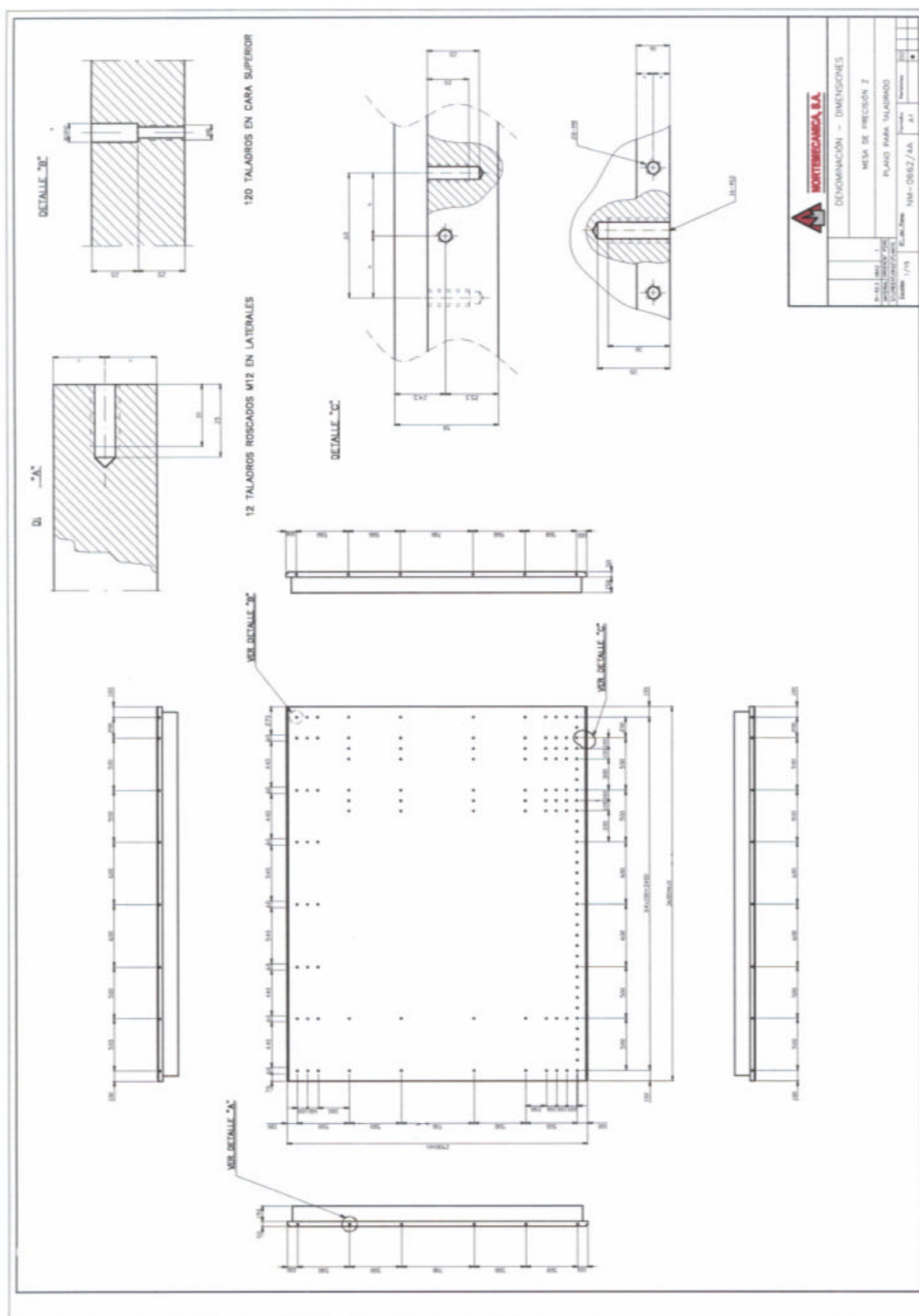


Figura 7.5.- Disposición de taladros en la mesa de precisión

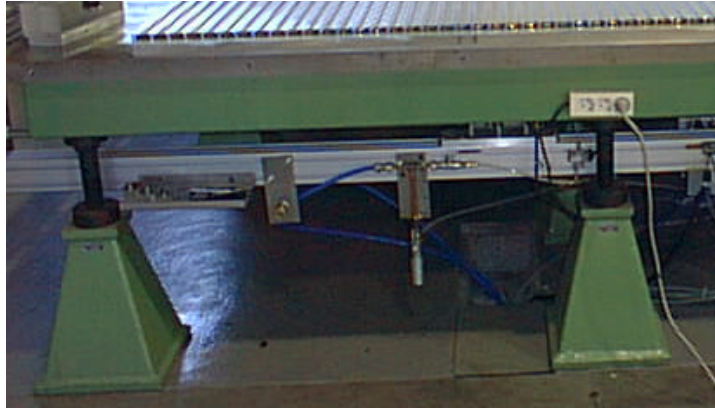


Figura 7.6.- Gatos soporte



Figura 7.7.- Detalle de gato soporte

Si tenemos en cuenta la simetría de la mesa y los apoyos de los gatos (figura 7.8), sin considerar el tubo rigidizador, podemos realizar un cálculo simplificado de la flecha máxima en cada octante de la misma.

Como hipótesis de cálculo, consideramos una viga apoyada en sus extremos A y B con una carga distribuida sobre ella de 90000 N (figura 7.10).

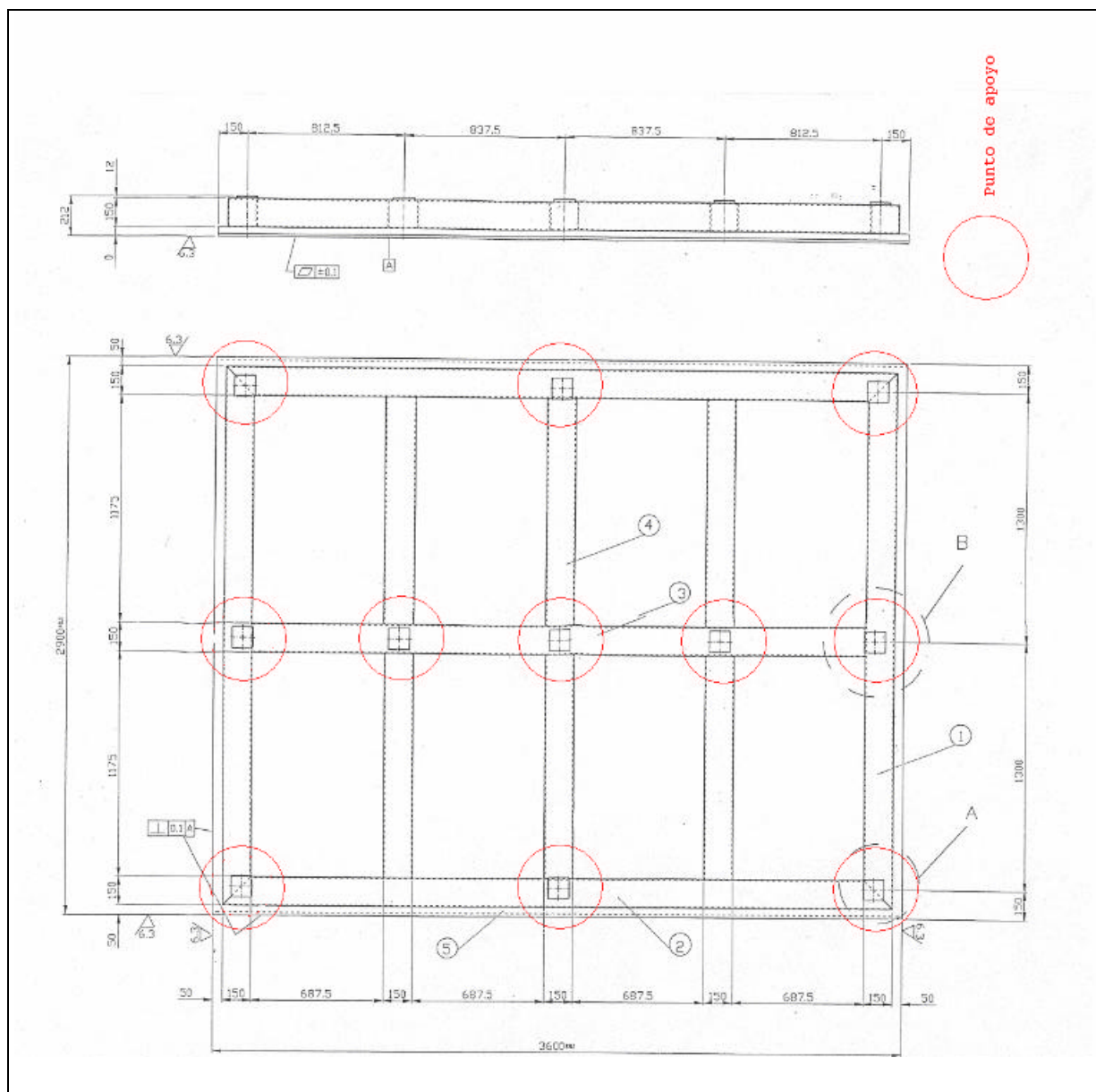


Figura 7.8.- Distribución de apoyos de los gatos (3-5-3)



Figura 7.9.- Inclinómetro Wyler

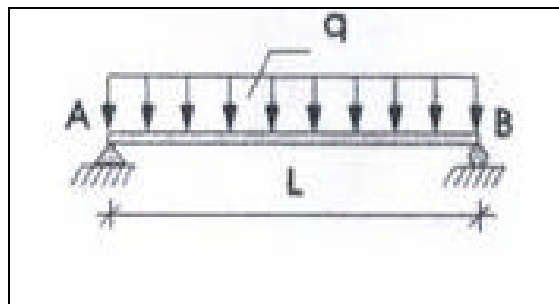


Figura 7.10.- Hipótesis de cálculo

La flecha vendrá dada por la expresión:

$$f = \frac{5}{384} \frac{q L^4}{EI} \quad (7.1)$$

Siendo:

$$q = 8620.7 \text{ N/m}^2 \text{ (carga por unidad de superficie)}$$

$$E = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2 \text{ (módulo de Young del acero)}$$

$$I = 1.35 \times 10^{-5} \text{ m}^4 \text{ (momento de inercia de la sección transversal)}$$

El valor que se obtiene es de 0.02 mm, 10 veces inferior a la planitud necesaria en la superficie de la mesa para la fabricación de las cámaras de deriva.

7.5.- FABRICACIÓN

Se encargó la fabricación de una mesa prototipo a la empresa Nortemecánica S.A. [6], de acuerdo con el diseño propuesto anteriormente. El tiempo de fabricación fue de unos 9 meses. El proceso consistió en el acopio del material necesario para la construcción de la mesa, soldadura de la estructura rigidizadora a la plancha, distensionado por vibración, desbaste para obtener la planitud requerida en la fresadora, distensionado por vibración y taladrado.

El distensionado vibracional, tras la soldadura y tras el desbaste mecánico, se utilizó para evitar deformaciones posteriores de la mesa. Las tensiones residuales en los metales son causadas por la deformación de partes de la estructura cristalina interna del propio material. Para restaurarla, es necesaria la introducción de energía en la pieza, mediante la aplicación de vibraciones de baja frecuencia y alta amplitud, durante un determinado período de tiempo, según el peso de la pieza a estabilizar.

Un distensionador consta de un vibrador que se sujeta a la pieza a distensionar (plancha) y de una consola electrónica (figura 7.11).



Figura 7.11.- Distensionador vibracional SRE 62

Una vez construida la mesa (figura 7.12), se supervisó en planta el control dimensional de la planitud de la misma en 35 puntos de su superficie, distribuidos como se ve en la figura 7.13; se comprobó además, el diámetro de los taladros y de las cotas funcionales, indicadas en la figura 7.14, con la fresadora puente.

Se comprobaron in situ los valores obtenidos (figura 7.15), dándose el visto bueno para su transporte e instalación en la nave de fabricación.

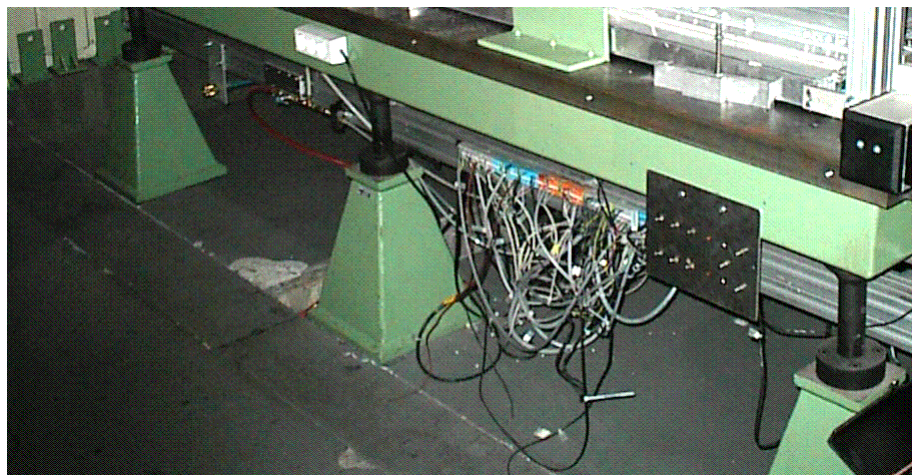


Figura 7.12.- Detalles de la mesa de precisión

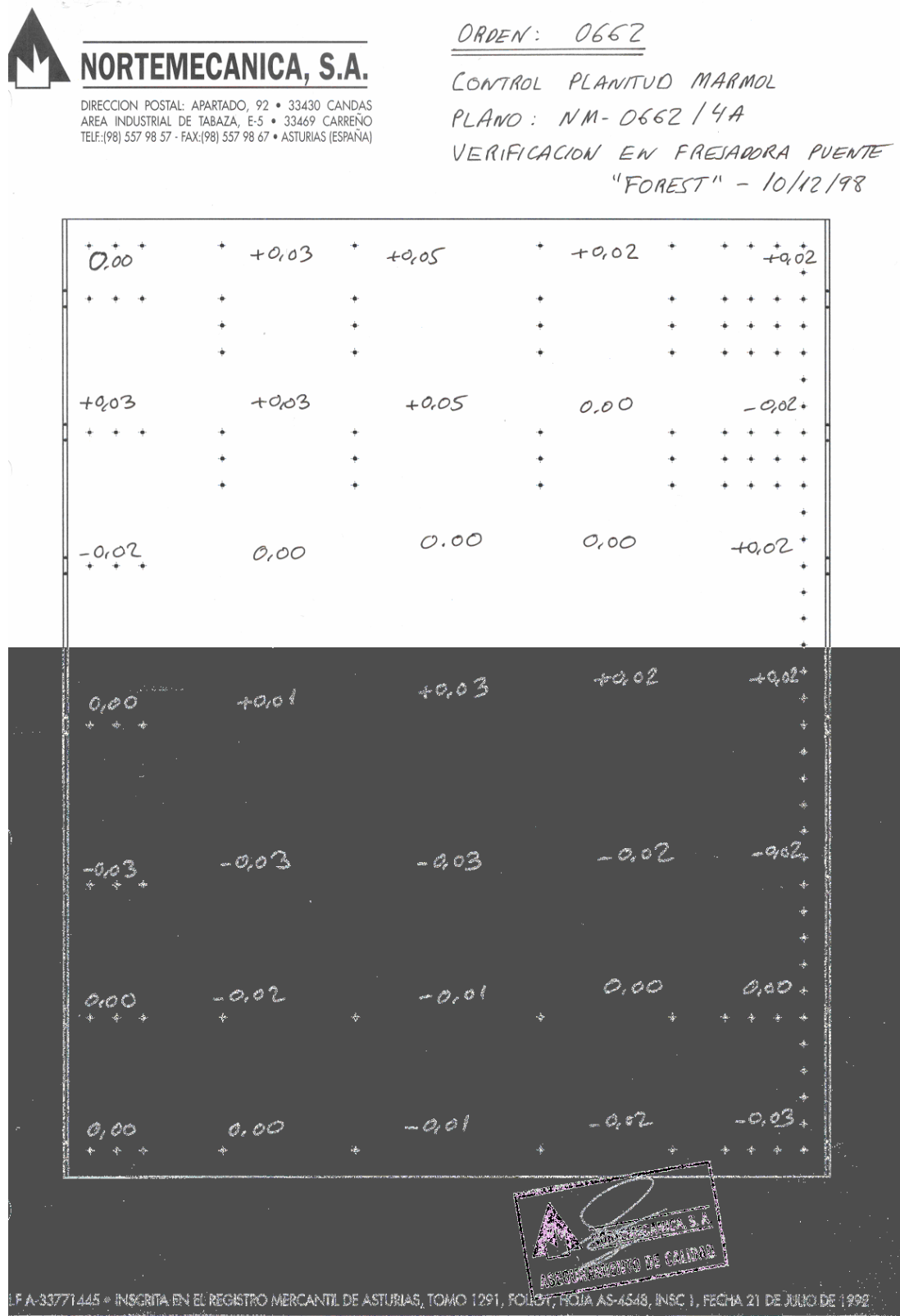


Figura 7.13.- Documentación de calidad. Planitud


INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS
ASESORAMIENTO DE CALIDAD

162

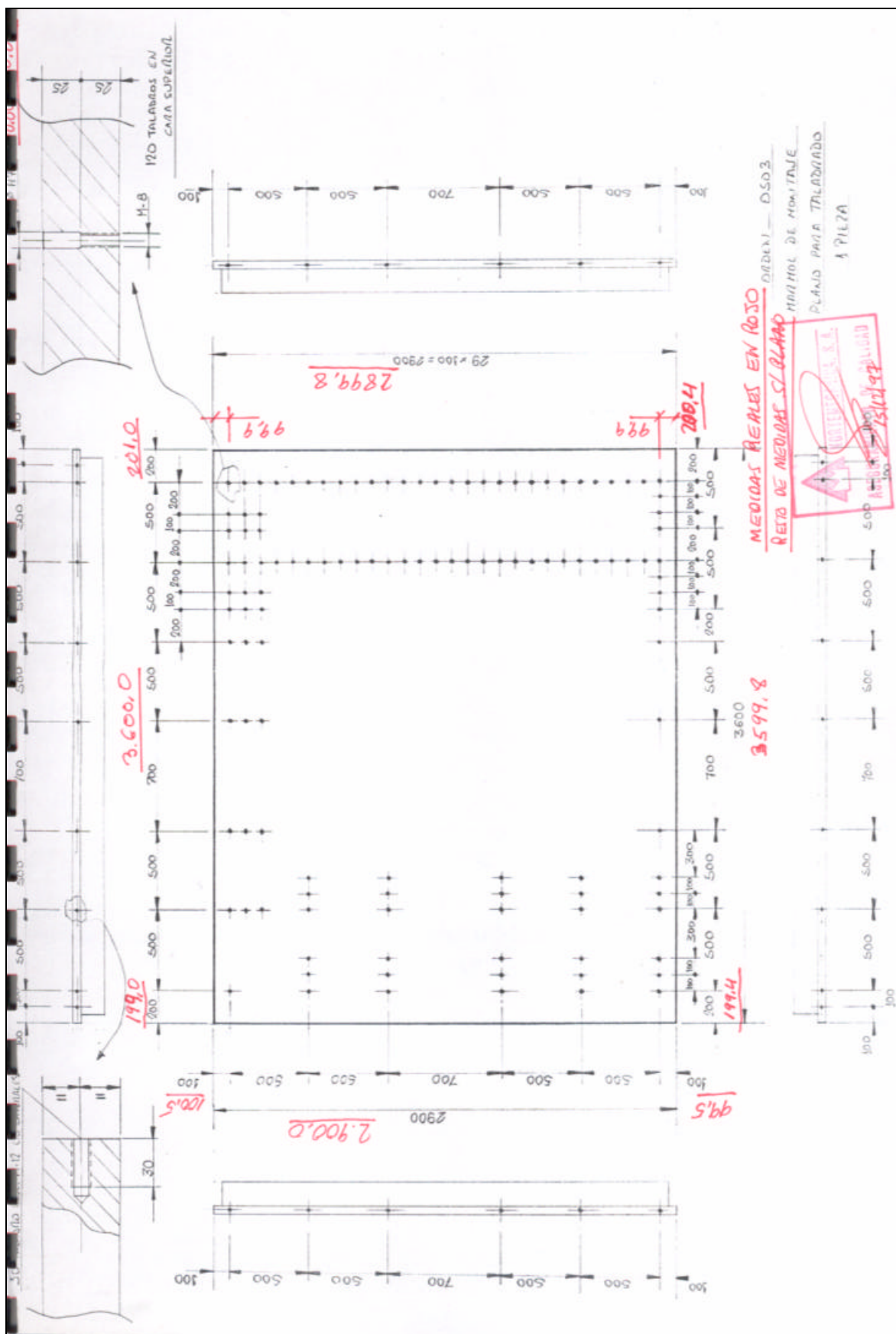


Figura 7.15.- Verificación de cotas funcionales y taladros.

7.6.- INSTALACIÓN EN PLANTA

Finalizado el proceso de fabricación, se transportó por carretera la mesa a la nave de producción, donde se descargó e instaló (figura 7.16). Posteriormente se procedió a su nivelación con los gatos y se midió la planitud para comprobar su adecuación a la fabricación de las cámaras de deriva.

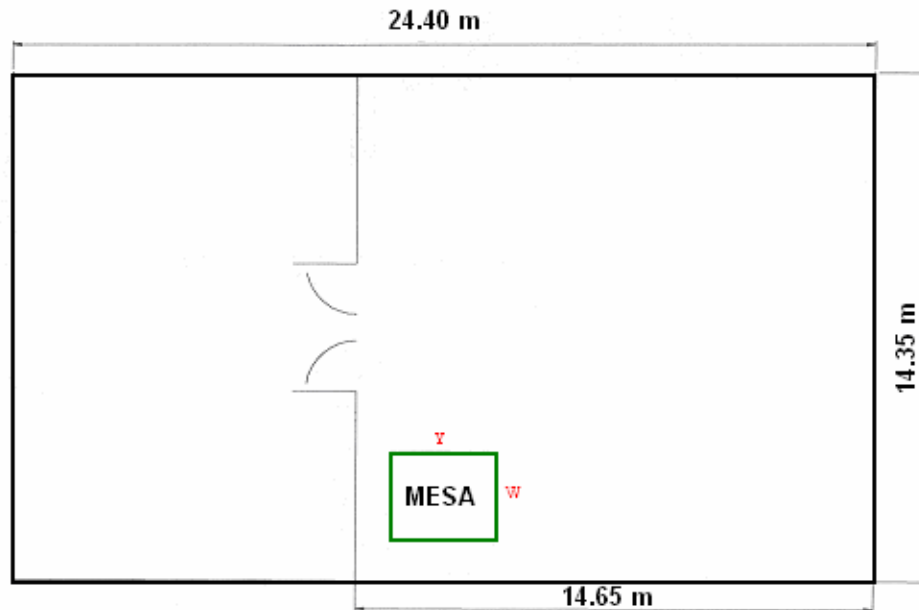


Figura 7.16.- Ubicación de la primera mesa en la nave de fabricación

7.6.1.- NIVELACIÓN

Para nivelar la mesa con los gatos elevadores, se siguió un procedimiento iterativo, comprobando la horizontalidad de la misma, con un inclinómetro Wyler de 0.05 mm /m de precisión [7]. El proceso diseñado constó de dos fases:

- Definición de un plano de referencia.
- Situación de los puntos medios de los lados de la mesa y puntos de las diagonales en el plano de referencia.

Se procedió de la siguiente forma:

- Inicialmente, se apoyó la plancha sobre los cuatro gatos situados en sus vértices, para definir el plano de referencia.
- A continuación, se pusieron a nivel los puntos medios de cada lado de la mesa, mediante desplazamiento vertical de los husillos de los gatos correspondientes. Se verificó la horizontalidad de cada uno de estos puntos, situando el inclinómetro en dos posiciones, invirtiendo el sentido inicial en la segunda.
- Seguidamente y de forma análoga, utilizando los gatos centrales, se nivelaron los puntos medios comprendidos entre cada gato de los vértices y el gato central.
- El siguiente paso fue la nivelación de los puntos medios de los 3 gatos situados en las dos diagonales de la mesa, repitiendo el proceso y actuando sobre el gato central de las mismas.
- Por último, se apoyaron los gatos restantes y se comprobaron de nuevo todos los puntos verificados con anterioridad, repitiendo en caso necesario el proceso hasta lograr la nivelación en todos los puntos, con un error de 0.05 mm/m.

7.6.2.- MEDIDA DE LA PLANITUD

Una vez comprobada la horizontalidad de la mesa se midió la planitud de su superficie mediante un interferómetro láser (figura 7.17). Para ello se utilizó un prisma (figura 7.18) que dirigía el láser sobre la superficie de la mesa, enfocándolo a un sensor, que es la parte móvil del sistema, que se desplazaba sobre una guía (figura 7.19).

El dispositivo detecta desplazamientos micrométricos con respecto al plano de referencia determinado por el láser. El procedimiento a seguir (figura 7.20) para la medida de planitudes se detalla en el manual de uso [8].



Figura 7.17.- Monitor y láser He-Ne 5528^a



Figura 7.18.- Óptica y accesorios del interferómetro láser (He-Ne) 5528^a

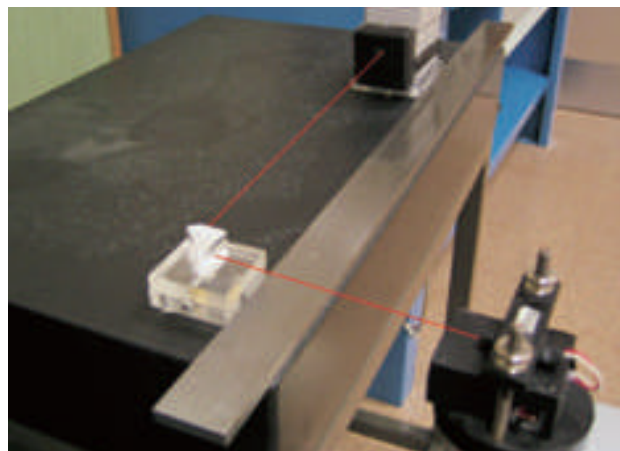


Figura 7.19.- Medida de planitud con un interferómetro láser

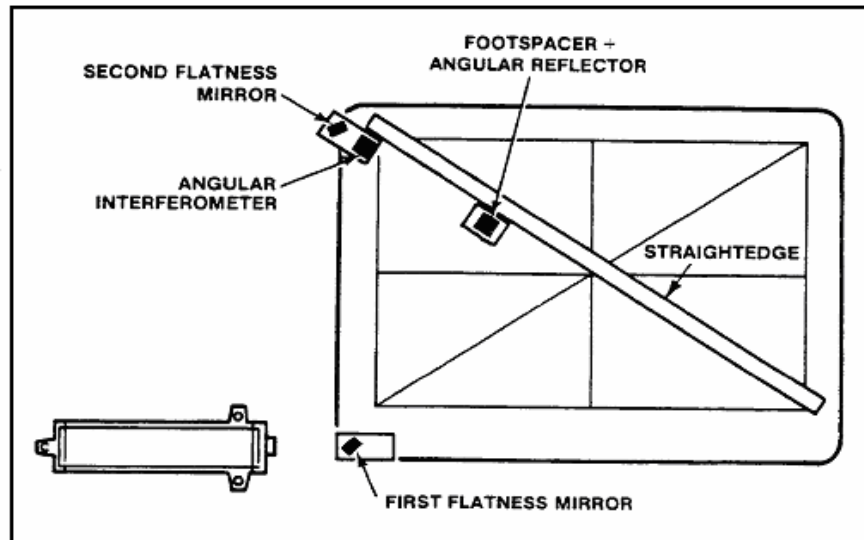


Figura 7.20.- Posicionamiento de la óptica para la primera medida

Se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 7.21 y 7.22, donde W e Y son los lados de la mesa indicados en la figura 7.16.

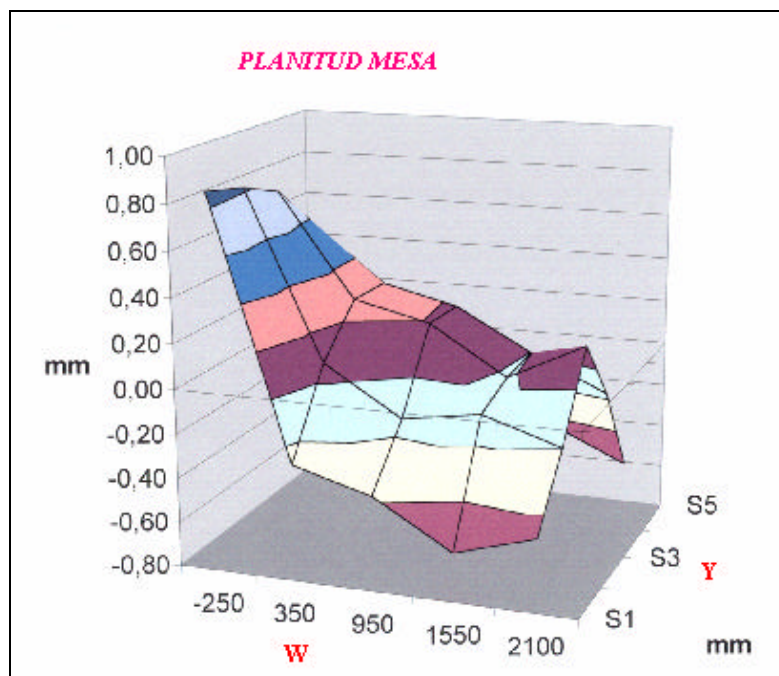


Figura 7.21.- Representación tridimensional de la planitud

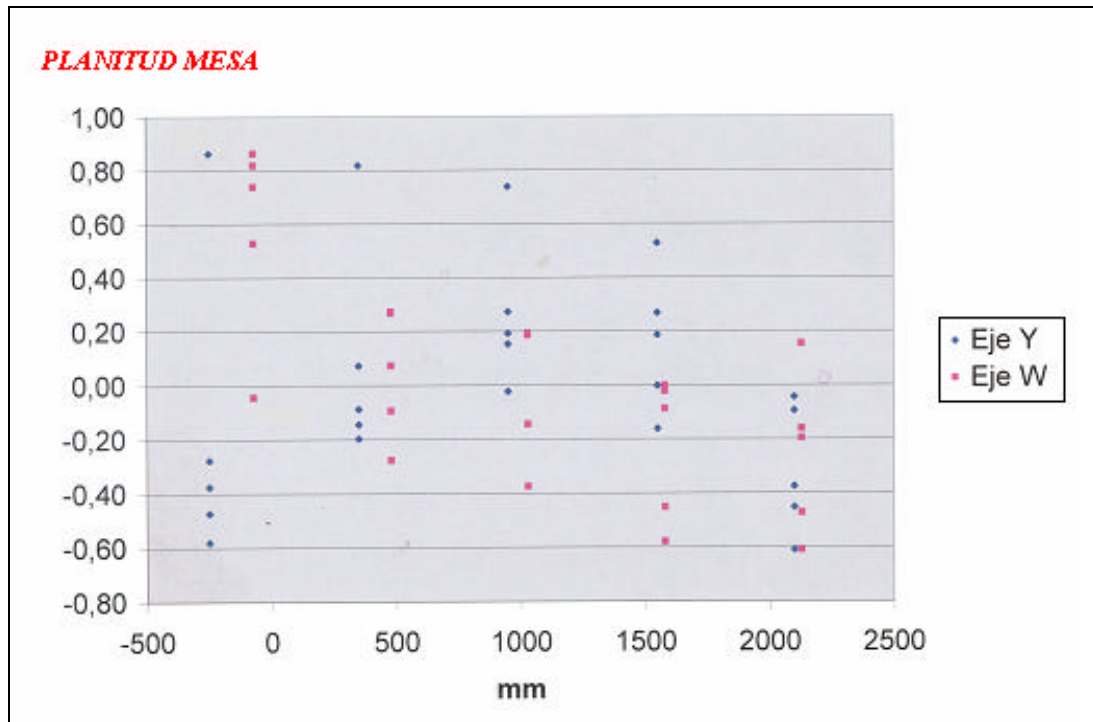


Figura 7.22.- Valores de la planitud obtenida con el interferómetro

Estos valores de la planitud que se obtuvieron son inferiores a 1 mm, condición necesaria para iniciar el proceso productivo.

7.7.- EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA PLANITUD

La mesa estaba formada, como se describió anteriormente, por una plancha de acero laminado (AISI 1040), rigidizada con tubo cuadrado (AISI 1040). Los coeficientes de dilatación lineal α son muy similares para ambos materiales:

$$\alpha = 11,7 \times 10^{-6} \mu\text{m } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ (AISI 1020)}$$

$$\alpha = 11,3 \times 10^{-6} \mu\text{m } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ (AISI 1040)}$$

Aunque la producción se realizaría a temperatura controlada, fue necesaria una estimación de su influencia en la planitud de la mesa, al ser posible variaciones de temperatura de hasta 10 °C en operaciones puntuales de carga y descarga en la planta.

Un cálculo conservativo de la variación de la planitud, suponiendo despreciable el espesor de la plancha de acero y estableciendo la proporcionalidad existente entre el radio de la curvatura originada por la dilatación del tubo cuadrado y su alargamiento, se obtiene mediante la expresión:

$$f = \frac{1}{16} \frac{L^2}{R} \quad (7.2) \quad \text{donde:}$$

L = longitud del tubo cuadrado (3.6 m)

R = Radio de curvatura: $R = \frac{L}{\Delta L} \Delta R$ (4780 m)

Se obtuvo un valor de la flecha: $f = 50 \mu\text{m}$, muy por debajo de la planitud requerida (200 μm).

7.8- AMPLIACIÓN DE LA MESA

La automatización de las operaciones necesarias para la fabricación de las cámaras de deriva, tales como la aplicación de adhesivo y la medición de hilos, y por tanto, la instalación de los coordinatógrafos que soportan los dispositivos que las realizan, hacían necesaria en la mesa de precisión, una superficie de apoyo algo mayor que la máxima que se puede mecanizar en la fresadora.

Esto planteó la necesidad de suplementar la misma sin incrementar la tolerancia admisible. Este problema se resolvió con la fabricación de suplementos (figura 7.23) que se atornillarían a la superficie de la mesa por su contorno exterior (figura 7.24).

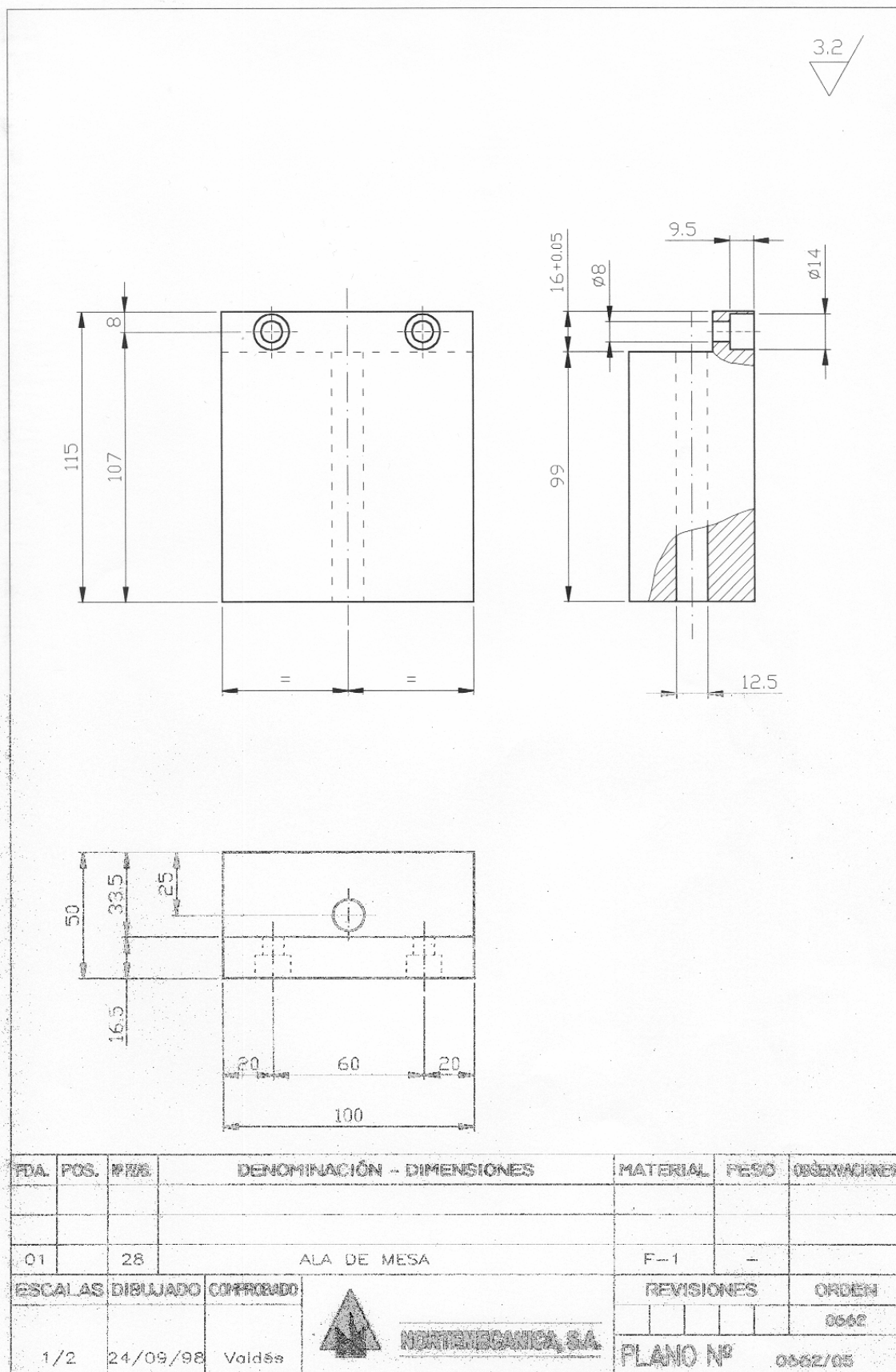


Figura 7.23.- Suplementos de la mesa de precisión

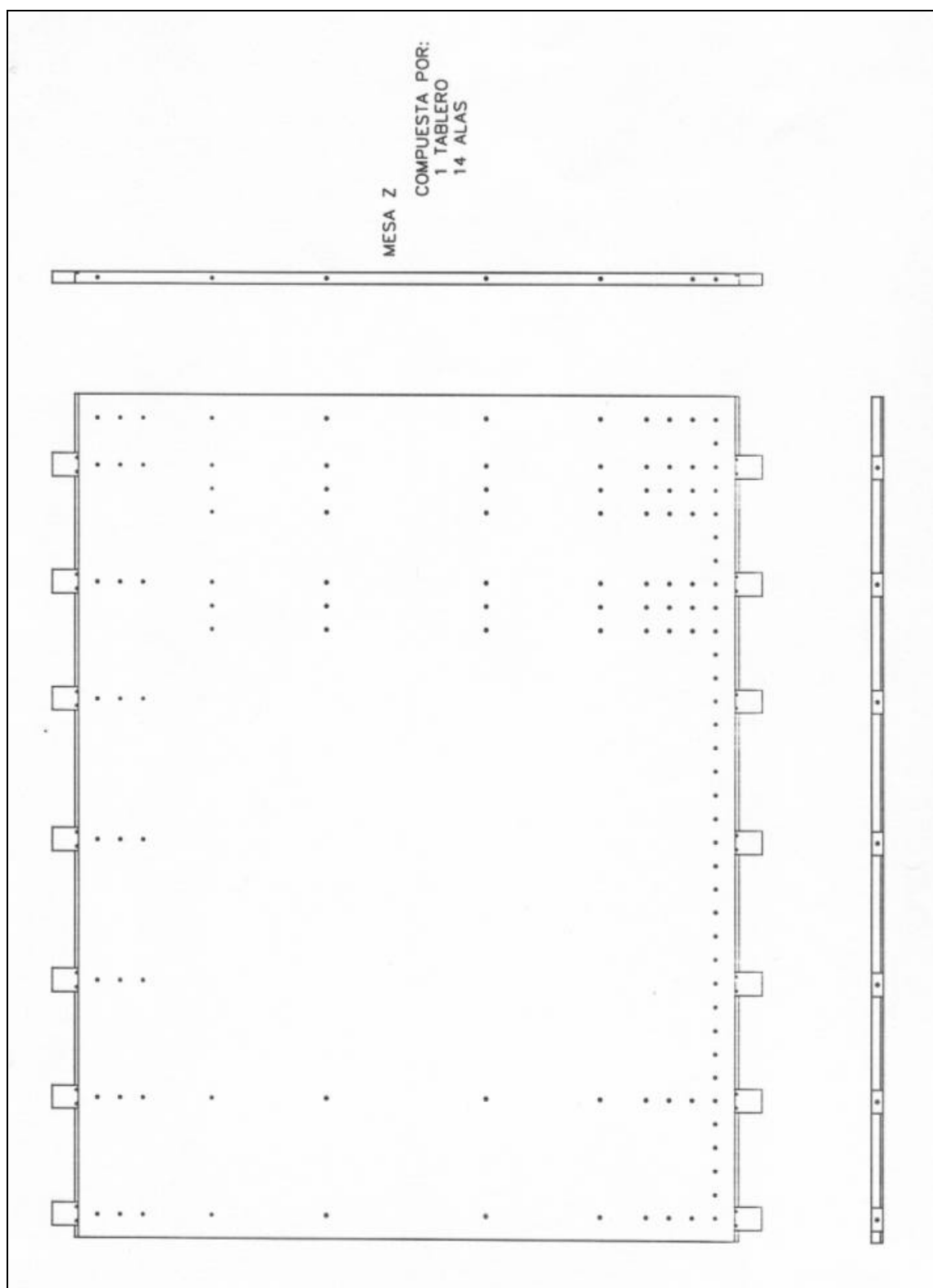


Figura 7.24.- Mesa con suplementos

7.9.- MESAS DE PRECISIÓN PARA LA FABRICACIÓN EN SERIE

Para el proceso productivo se diseñaron tres líneas de fabricación en serie de supercapas, con el objetivo de fabricar simultáneamente las tres supercapas necesarias para la construcción de una cámara de deriva tipo MB2 [9], utilizando sólo dos líneas, para la fabricación de una cámara de deriva, tipo MB4.

Dos de estas líneas lo serían para la fabricación de supercapas P, y la otra, para la fabricación de las supercapas Z, como se verá en el capítulo siguiente. Además, sería necesaria una cuarta mesa para el montaje completo de las cámaras de deriva.

Las cuatro mesas serían idénticas a la mesa prototipo por motivos económicos y de rapidez. La situación de las mesas en la nave de montaje quedó como se refleja en la figura 7.25.

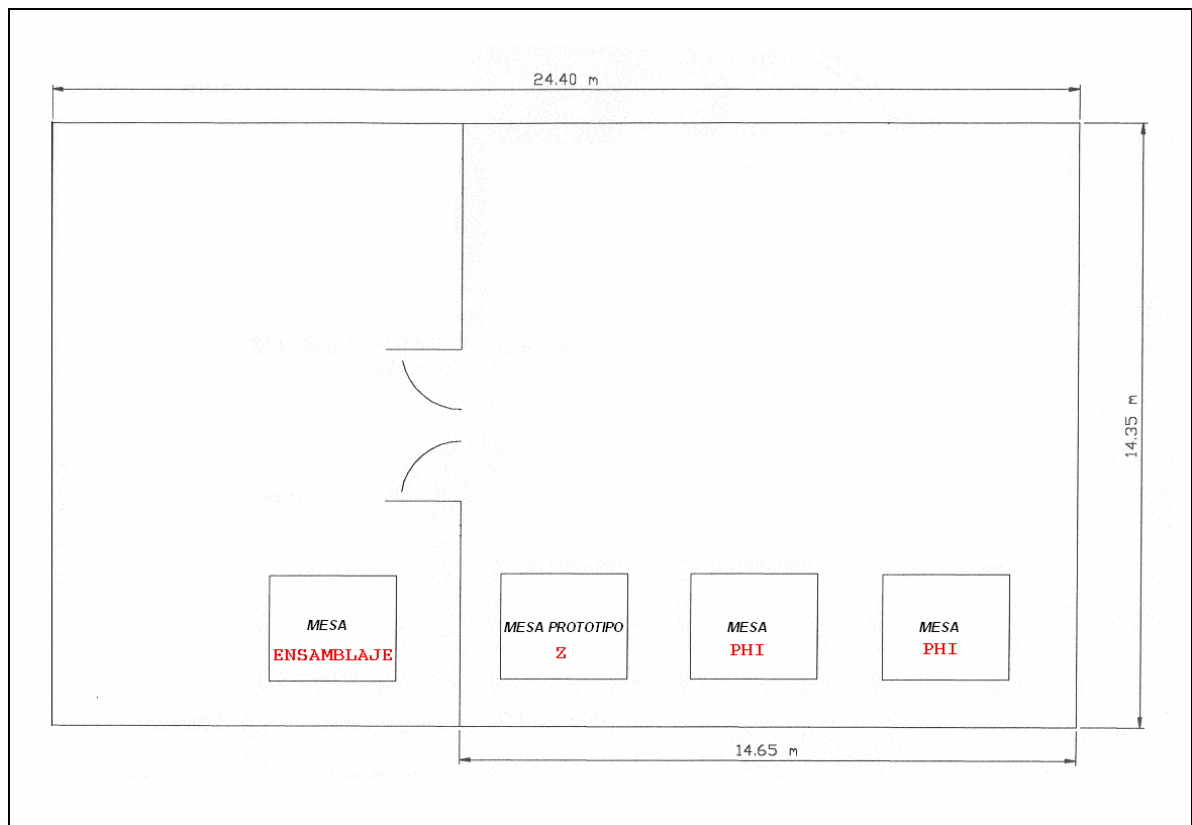


Figura 7.25.- Ubicación de las mesas de montaje en la nave de fabricación

REFERENCIAS

- [1] Simulation of gaseous detectors. <http://garfield.web.cern.ch/garfield>
- [2] Detectores de deriva. I. Durán, L. Martínez. Ciemat632. 1.989
- [3] Factores determinantes de los tiempos de colección de cargas de una cámara de deriva. J. Casulleras. UAB. 1.984.
- [4] Measurements and inspection on 15 panels produced by Excel for INFN, experiment CMS@)CERN. Report INFN 2.000.
- [5] Performance and mechanical tolerances achieved with a full size prototype of a CMS Barrel Muon Drift Tubes Chamber. CMS NOTE. 1.998.
- [6] <http://www.nortemecanica.es/>
- [7] <http://www.bowers.co.uk/images/cms/File/Catalogues/2-levelling.pdf>
- [8] Flatness Measurements.5528 A Laser Measurement System User's Guide.1.992
- [9] "The CMS muon project. CMS Technical Design Report". CERN / LHCC 97-32, CMS TDR 3. 15 Diciembre 1.997.

CAPÍTULO 8

PRODUCCIÓN EN SERIE DE CÁMARAS DE DERIVA

8.1.- INTRODUCCIÓN

Tras la experiencia adquirida con la fabricación en serie de 96 cámaras de deriva para el detector L3 del experimento LEP, fabricación artesanal con un gran número de operarios implicados en la misma, surgió la necesidad de optimizar y sistematizar la producción de cámaras de deriva para futuros experimentos de física de partículas. El objetivo era, por una parte, reducir drásticamente el número de operarios implicados en el proceso productivo; y por otra, automatizar en lo posible las operaciones necesarias para su fabricación.

Esto implicaba, además, una selección estricta del personal implicado en el proceso, con operarios altamente cualificados, un diseño de las líneas de fabricación y montaje necesarias, y el establecimiento de un sistema de control de la calidad basado en el principio de “cero defectos”.

La automatización de este proceso tiene la ventaja de reducir costos, pero también de aumentar la fiabilidad del detector. La forma de realizar la optimización del proceso, así como la demostración de la calidad que se obtendría con él, es una aportación original de esta tesis doctoral. El éxito de dicho proceso ha quedado patente por los propios hechos, habiéndose realizado y puesto en producción el sistema, con un éxito absoluto por la calidad de las cámaras así fabricadas.

En este capítulo se describe, en primer lugar, el proceso de fabricación en el CIEMAT de las cámaras de deriva para el experimento CMS. Los útiles para su construcción, y la definición de las diferentes etapas de fabricación, fueron desarrollados y puestos a punto durante el bienio 1999-2000. Los requisitos básicos que este proceso debía cumplir, así como los procedimientos de control de calidad exigibles en cada etapa, fueron

discutidos y acordados con el resto de la Colaboración implicada en la construcción del detector central de muones de CMS.

La fabricación de diversos prototipos, tanto de tamaño reducido [1] como real [2], jugó un papel fundamental de cara a la producción. La validación final de todo el proceso tuvo lugar a principios del año 2001, cuando se construyó en el CIEMAT la primera cámara, que incorporaba todas las modificaciones propuestas en el diseño para la versión final de las cámaras de deriva aprobada por la Colaboración .

En segundo lugar, se detallan las pruebas que se diseñaron y pusieron en práctica en el CIEMAT con cada supercapa, una vez terminada su fabricación mecánica, para garantizar su correcto funcionamiento [3]. Estas pruebas se realizaban una vez instaladas la electrónica de alta tensión y de lectura. Las supercapas que superaban estas pruebas pasaban al proceso de montaje para formar parte de una cámara de deriva.

Las cámaras de deriva, una vez probadas, eran enviadas al CERN donde permanecían almacenadas temporalmente. Durante este período, se completaba su equipamiento, eran sometidas de nuevo al conjunto de pruebas de control de calidad que se describen en este capítulo y, una vez validadas, se ensamblaban con otros elementos del detector (cámaras RPCs). Por último, eran transportadas a la zona SX5, zona de montaje en superficie del área experimental donde se ubica CMS en LHC. Allí tenía lugar su instalación en el detector global.

8.2.- RESPONSABILIDADES EN LA FABRICACIÓN

La Colaboración encargada de la producción de las cámaras de deriva para CMS estaba formada por varios Institutos de diversos países. Funcionaban cuatro centros de producción, en los que se efectuaba la fabricación de los distintos tipos de cámaras de deriva del detector.

El detector consta de cinco ruedas (-2, -1, 0, 1, 2) en el sentido longitudinal del haz (figura 8.1), siendo la rueda 0 la central; cada una de ellas con 50 estaciones instaladas en los huecos correspondientes al entrehierro del imán (figura 8.2).

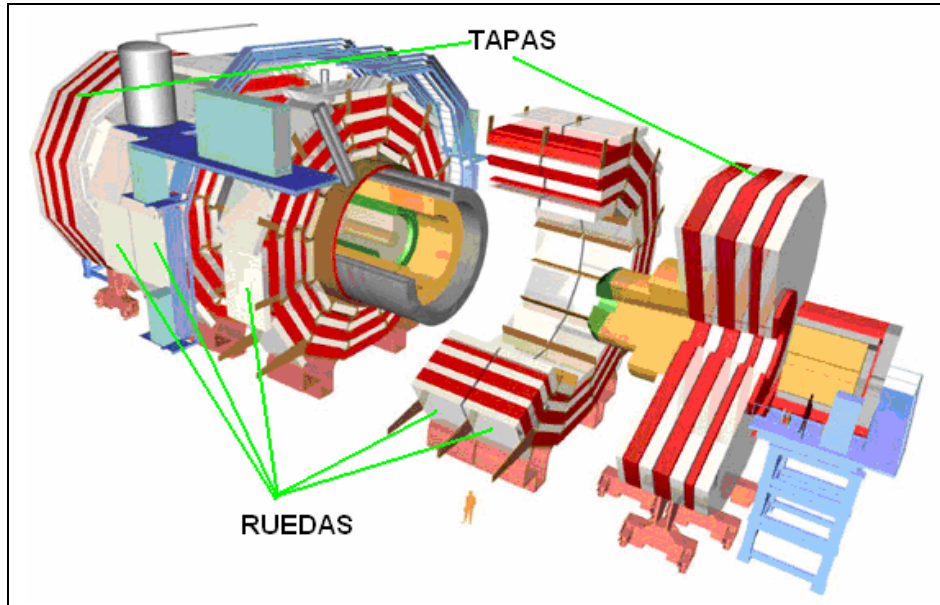


Figura 8.1.- Perspectiva explosionada de las ruedas de CMS

Las estaciones están distribuidas por capas, en función de la cercanía al punto de interacción del haz, denominadas MB1, MB2, MB3 y MB4 (figura 8.2). Cada estación está formada por una cámara de deriva y dos cámaras RPC (Resistive Plate Chamber), en el caso de las estaciones MB1 y MB2; y una cámara de deriva y una cámara RPC, en las estaciones MB3 y MB4.

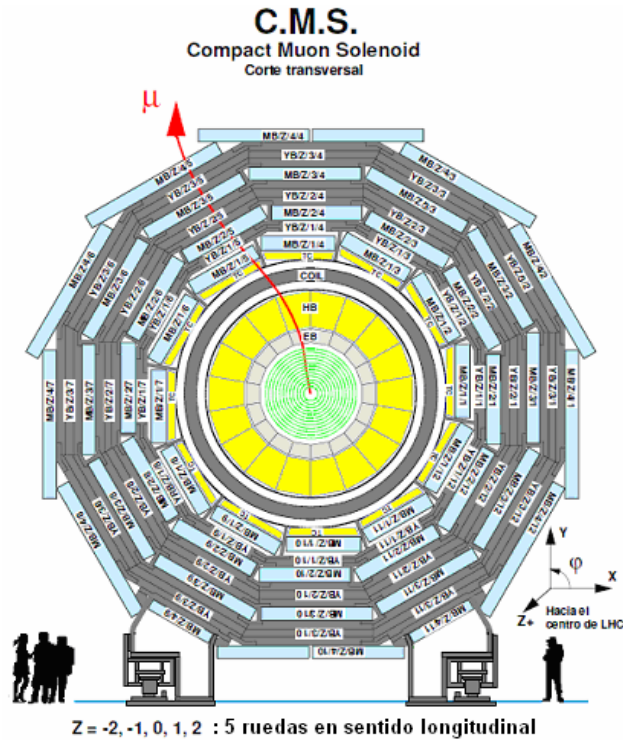


Figura 8.2.- Corte transversal de una de las ruedas de CMS

Las 250 cámaras de deriva se fabricaron en los cuatro centros de producción como se detalla a continuación:

- **RWTH** (Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule. Aquisgrán, Alemania): 60 MB1 + 10 MB4 (sectores 9 y 11)
- **CIEMAT** (Madrid): 60 MB2 + 10 MB4 (sector 10)
- **INFN** (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Laboratori di Legnaro, Italia): 60 MB3 + 10 MB4 (sector 4), (secciones de las Universidades de Padua y Bolonia, Italia)
- **INFN** Universidad de Turín (Italia): 40 MB4 (sectores 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 12)

Considerando el número de canales electrónicos de señal correspondientes a cada uno de los hilos anódicos, la contribución del INFN (Italia), RWTH (Alemania) y CIEMAT (España) fue aproximadamente del 50%, 25% y 25% del total respectivamente (Figura 8.3).

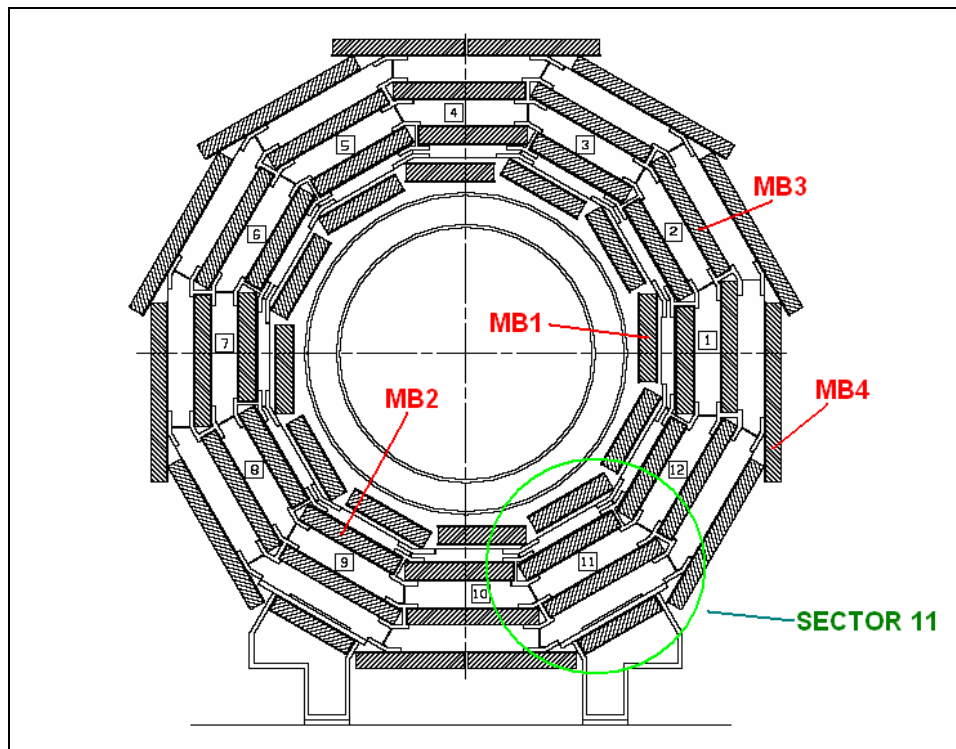


Figura 8.3.- Distribución por sectores azimutales de las cámaras de deriva de CMS

Además de los cuatro centros de fabricación, otros Institutos contribuyeron al proceso elaborando algunos de los componentes básicos, que requerían cierta preparación o ensamblaje previos al mismo:

- **LPP** (Laboratory of Particle Physics. Dubna. Rusia), utilizando los útiles de montaje desarrollados y ensamblados en el INFN de Turín, se encargó de la producción de las planchas de aluminio con los electrodos ya incorporados.
- **IHEP** (Institute for High Energy Physics. Protvino. Moscú. Rusia), con útiles de montaje desarrollados y ensamblados en el Instituto de Bolonia, se preparaban los cátodos a partir de las vigas de aluminio extruído, las bandas de mylar y los electrodos.
- **IHEP** (Beijing, China), bajo la supervisión del INFN de Padua, suministraba las tarjetas de distribución de alta tensión (HVB), de acoplo (HVC) y los cables de distribución de la alta tensión.

Otros componentes importantes, cuyo diseño y producción eran responsabilidad de algún Instituto de la Colaboración, eran:

- La electrónica de lectura (Readout Boards. ROBs), desarrollada y suministrada a la Colaboración por el CIEMAT.
- Las Instalaciones de gas y refrigeración, desarrollada y suministrada a toda la Colaboración por el Instituto de Aquisgrán.
- La electrónica de FE (Front End), desarrollada en el INFN de Padua; y el Trigger (dispositivo que indica el comienzo del proceso de detección), desarrollados conjuntamente con el INFN de Bolonia.

El resto de componentes, de mayor simplicidad, fueron suministrados por industrias a las que previamente se les había proporcionado sus especificaciones técnicas.

8.3.- IMPLANTACIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO

8.3.1.- INTRODUCCIÓN

La construcción de las cámaras de deriva se llevó a cabo en los Institutos citados anteriormente. Cada uno de ellos disponía de un área destinada a su fabricación. La fabricación de las cámaras de deriva en el CIEMAT se llevó a cabo en el edificio 75 A (figura 8.4). Este edificio, ya utilizado en la fabricación de cámaras de deriva para el experimento L3, fue acondicionado para fabricar las 70 cámaras para el experimento CMS.



Figura 8.4.- Área de fabricación. Edificio 75A CIEMAT

8.3.2.- LAS CÁMARAS DE DERIVA COMO PRODUCTO DE FABRICACIÓN

Las 70 cámaras de deriva que se fabricaron en el CIEMAT eran de los tipos MB2 (60) Y MB4 (10) (figura 8.5), 12 cámaras por rueda del detector; correspondiendo las MB4 al sector 10 de dicha rueda (figura 8.6).

Todas las cámaras están formadas por varias supercapas y un panel rigidizador, ensamblados mediante adhesivo. Las de tipo MB2 están formadas, cada una de ellas, por tres supercapas apiladas, dos de ellas iguales. Estas dos supercapas iguales son exteriores, con sus hilos anódicos paralelos al eje del haz de protones para medir la coordenada Φ del

muón (supercapas Φ). Y la supercapa interior tiene sus hilos perpendiculares al haz para medir la coordenada Z del muón (supercapas Z). La parte superior de la cámara MB2 está constituida por una supercapa Φ y una Z, unidas y la parte inferior por otra supercapa Z. Ambas partes están separadas por un elemento rigidizador (honeycomb) intermedio (HC1) (figura 8.7).

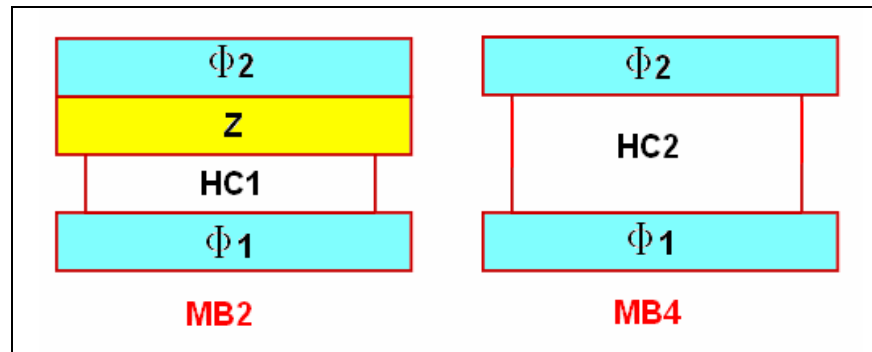


Figura 8.5.- Esquema simplificado de cámaras MB2 y MB4

Las cámaras tipo MB4 están constituidas sólo por las dos supercapas exteriores Φ y un honeycomb (HC2). La unión entre supercapas y entre supercapas y honeycomb se realiza mediante pegado con adhesivo estructural rápido (araldit 2012).

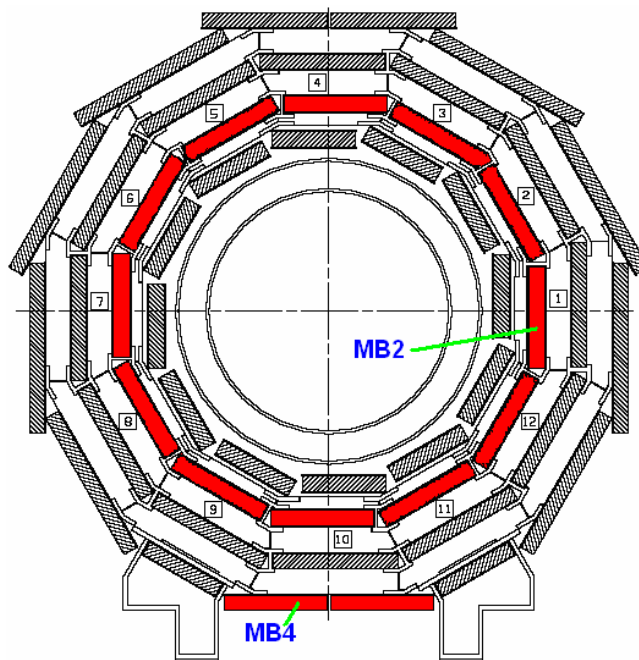


Figura 8.6.- Cámaras de deriva fabricadas en el CIEMAT (en rojo)

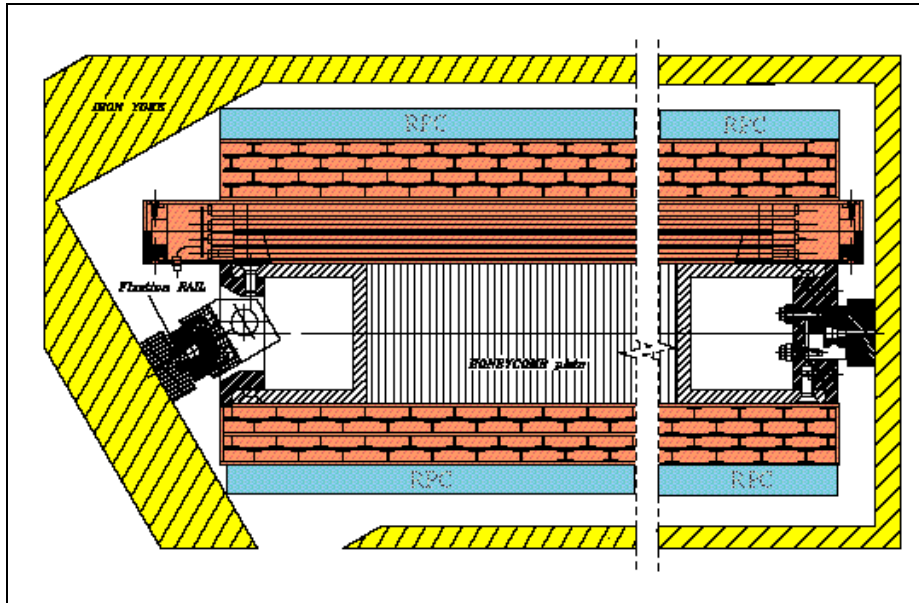


Figura 8.7.- Detalle de una cámara de deriva MB2 en su alojamiento

Cada supercapa está compuesta por cuatro capas de tubos de deriva superpuestas, construidas desplazando las celdas en capas consecutivas una longitud igual a la mitad del ancho de la misma, de forma que se elimine la ambigüedad izquierda-derecha en la reconstrucción de la trayectoria del muón.

Cada capa es un plano de celdas de deriva, formado por dos planchas de aluminio separadas por vigas paralelas también de aluminio (cátodos), colocadas perpendicularmente a uno de los lados de las planchas (figura 8.8).

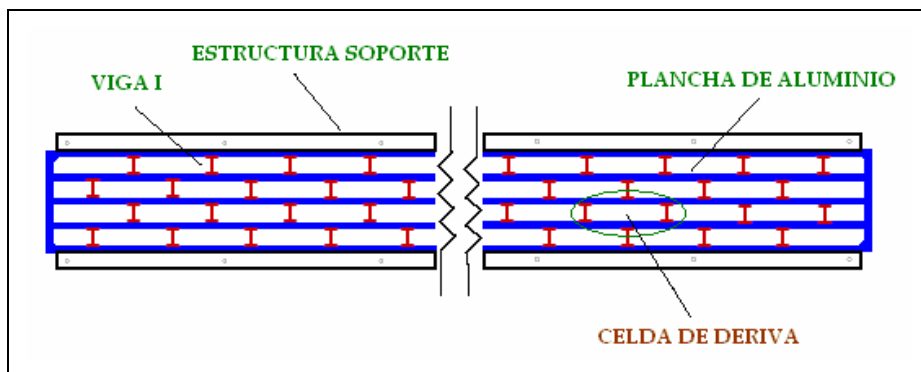


Figura 8.8.- Corte transversal de una supercapa con sus cuatro capas

La celda de deriva es el volumen comprendido entre cada dos vigas consecutivas de cada capa, y está constituida por un hilo central (ánodo), las dos vigas (con los cátodos) y los electrodos conformadores del campo eléctrico. El diseño definitivo, probado satisfactoriamente en el último prototipo (Q4) fabricado en el CIEMAT, se aprecia en la figura 8.9 [2].

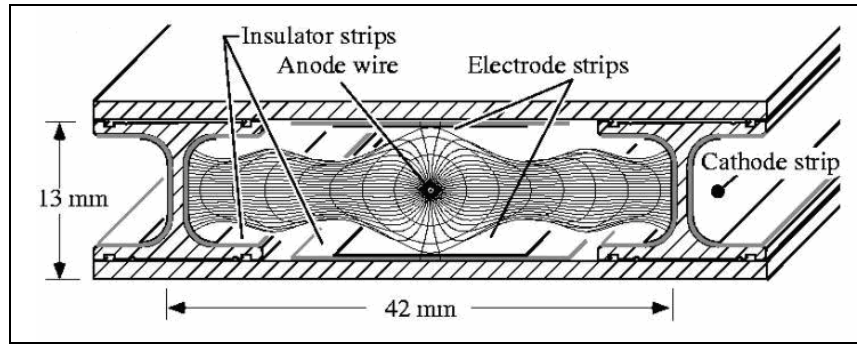


Figura 8.9.- Celda de deriva

Las dimensiones de las cámaras fabricadas se encuentran en la tabla 8.1 [3].

CMS Barrel Muon Parameters: Number of DT channels

(*) The DT Chamber dimensions are taken from the "Muon Box (radial)" table (Date: 14-Mars-1996) and related drawings

(*) The estimation of the number of channels is made as: Length/Pitch - 2

(*) The Y dimension does not include the attached RPC's and it is estimated assuming a 128 mm HComb and 2 mm Aluminum Plates

X/Z Pitch	40
Y Pitch	13
HComb	128

DT Chamber dimensions

	Sector	Dimensiones			#channels		
		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Phi	Z	Total
MB1 Station	all	1990	290	2536	376	244	620
MB2 Station	all	2450	290	2536	472	244	716
MB3 Station	all	3030	290	2536	584	244	828
MB4 Station	Average	-	290	2536	782	244	1026
					2214	976	3190
							191400

Special Chamber Dimensions

Dimensions for MB4		Dimensions			#channels	
	Sector	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Phi	Z
MB4 Station	1,2,3,9,10,11	4190	360	2536	816	244
	4,8	3880	360	2536	760	244
	5,7	1990	360	2536	376	244
	6	5350	360	2536	1048	244
	12	5966	360	2536	1176	244

	Whell #	#Units	Needed modification
Iron I-ribs	0	12 MB1	shorter in X
Chimneys	1, -1	2x(MB1-MB4)	Shorter in Z 300 mm

Tabla 8.1.- Parámetros de las cámaras de deriva.

8.3.3.- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Se diseñaron tres líneas de montaje para la fabricación en serie de supercapas, al objeto de finalizar la fabricación de forma simultánea, de las supercapas necesarias para la construcción de las cámaras. En dos de estas líneas se fabricaron supercapas Φ (también llamadas P) y en la otra supercapas Z (también llamadas θ).

Cada línea de montaje constaba de una mesa de precisión instrumentada con un coordinatógrafo de dos ejes, controlado por ordenador, con todos los dispositivos necesarios para la fabricación de una supercapa, a saber: un cabezal compuesto de un dispensador de adhesivo dotado de mezclador de componentes, y un dispositivo medidor de hilos, consistente en una cámara de vídeo con digitalizador [4] (figura 8.10).

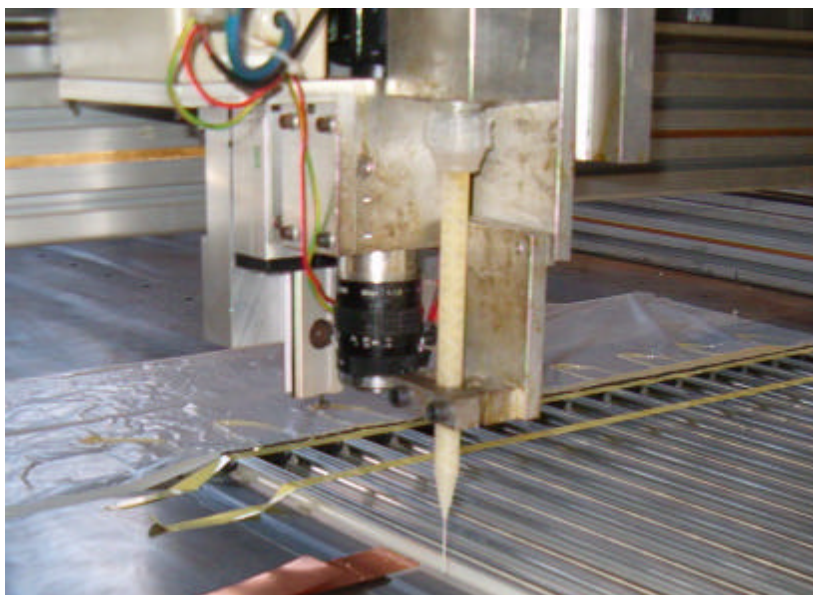


Figura 8.10.- Conjunto dispensador de adhesivo – medidor de hilos

Una vez finalizada la construcción de las supercapas, y previo control de estanqueidad, éstas se ensamblaban en una zona de montaje que disponía de dos mesas: una, de precisión idéntica a las anteriores, con un coordinatógrafo de dos ejes para la fabricación mecánica de la cámara, instrumentado con un cabezal con un dispensador de adhesivo y con un dispositivo medidor de la planitud de supercapas (figura 8.11), del

honeycomb y de la cámara (transductor de desplazamiento). Y otra mesa, de menores prestaciones, para la instrumentación electrónica y pruebas finales de la cámara.

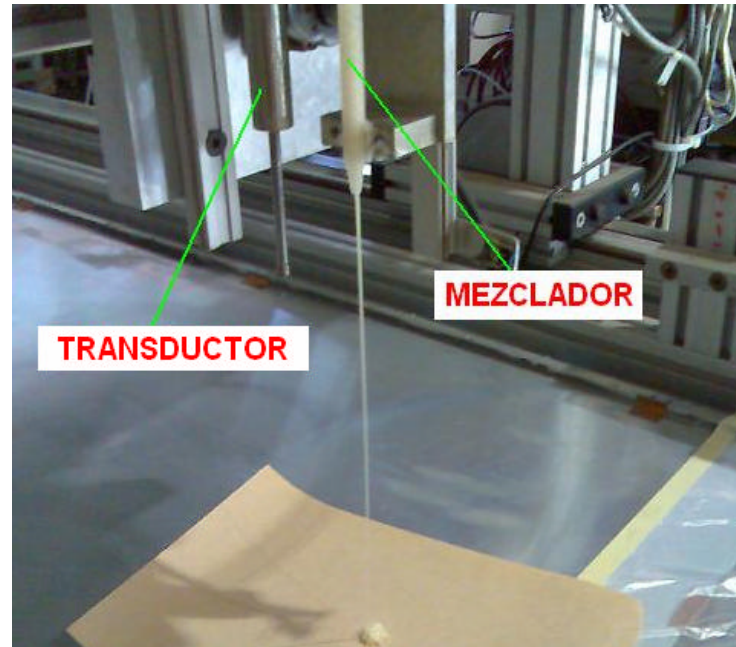


Figura 8.11.- Conjunto dispensador de adhesivo – medidor de planitud

El control global del proceso era automático, para permitir maximizar tanto la productividad de la fabricación de las cámaras como su nivel de seguridad y fiabilidad, y al mismo tiempo, facilitar las tareas de los operarios (Anexo).

8.3.4.- DISPOSICIÓN EN PLANTA

El edificio 75^a, tras la reforma, se dividió en dos partes: una zona limpia para la fabricación de supercapas, y otra zona de ensamblaje de cámaras. Ambas zonas estaban separadas por una pared intermedia de chapa corrugada, con acceso central por una puerta (figura 8.12).

En cada zona estaba instalado un puente grúa: uno de 3.2 T, en la de fabricación de supercapas; y otro de 1 T, en la de ensamblaje de cámaras.

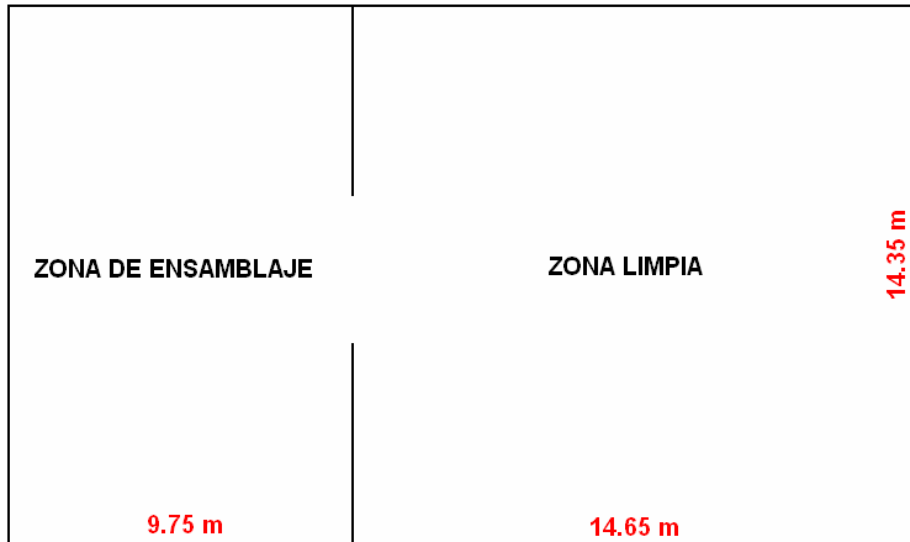


Figura 8.12.- Zonas y dimensiones de la planta de fabricación

Además de las 4 mesas de precisión con sus coordinatógrafos, fue necesario ubicar:

- Una mesa para instrumentación electrónica y pruebas.
- Una mesa de acabado mecánico y test de estanqueidad.
- Un puesto de control del proceso.
- Un puesto de control de la electrónica asociada a las cámaras y pruebas.
- Los útiles necesarios para la fabricación:
 - Distribuidor de pesos para el pegado
 - Dispositivo para pegado de vigas
 - Manipulador neumático de planchas de aluminio
 - Maquina automática preparación y almacenamiento de hilos anódicos
 - Medidor de la tensión mecánica de hilos
- Almacenamiento:
 - Estructura para almacenamiento y transporte de 5 cámaras terminadas
 - Armario para clasificación de piezas y accesorios
 - Estanterías para almacenamiento de material genérico
 - Estructura soporte para almacenamiento de planchas de aluminio
 - Estantería para almacenamiento de cátodos
 - Estantería para almacenamiento de material electrónico

En la figura 8.13 se indica la distribución de todos estos elementos en planta. Se observa la división de las zonas de fabricación y montaje, así como las zonas libres reglamentadas para el tráfico horizontal y vertical de útiles de transporte, carga y descarga, y para el tránsito de personas.

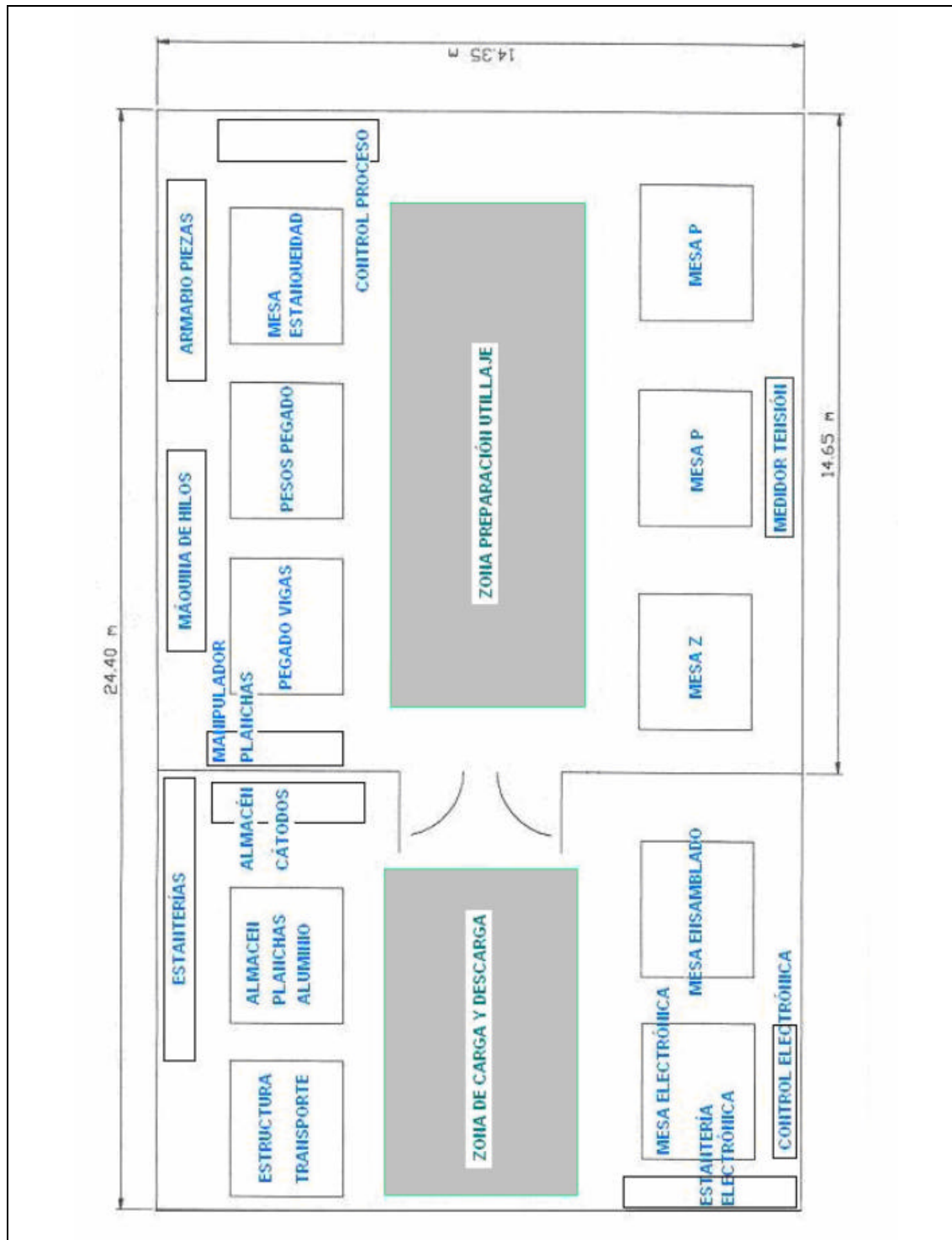


Figura 8.13.- Distribución en planta

8.3.5.- ORGANIGRAMA DEL PROCESO

La operación básica del proceso industrial de fabricación de cámaras de deriva era la fabricación de una supercapa. Cada supercapa estaba constituida por un grupo de cuatro capas superpuestas.

El organigrama general del proceso de fabricación de cámaras es el de la figura 8.14, una vez fabricadas las supercapas que forman parte de las cámaras. La fabricación de supercapas viene descrita en el organigrama de la figura 8.15.

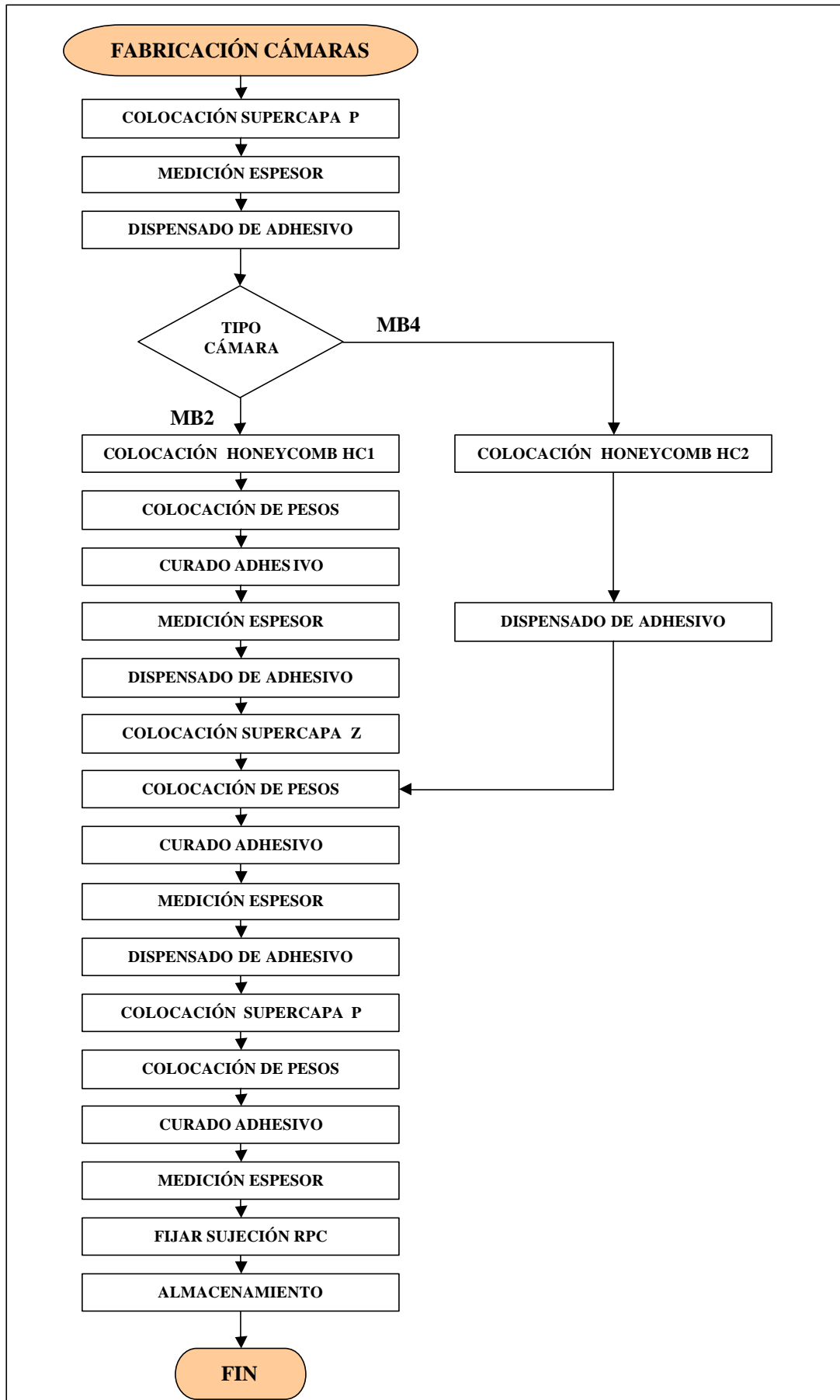


Figura 8.14.- Diagrama de bloques del proceso

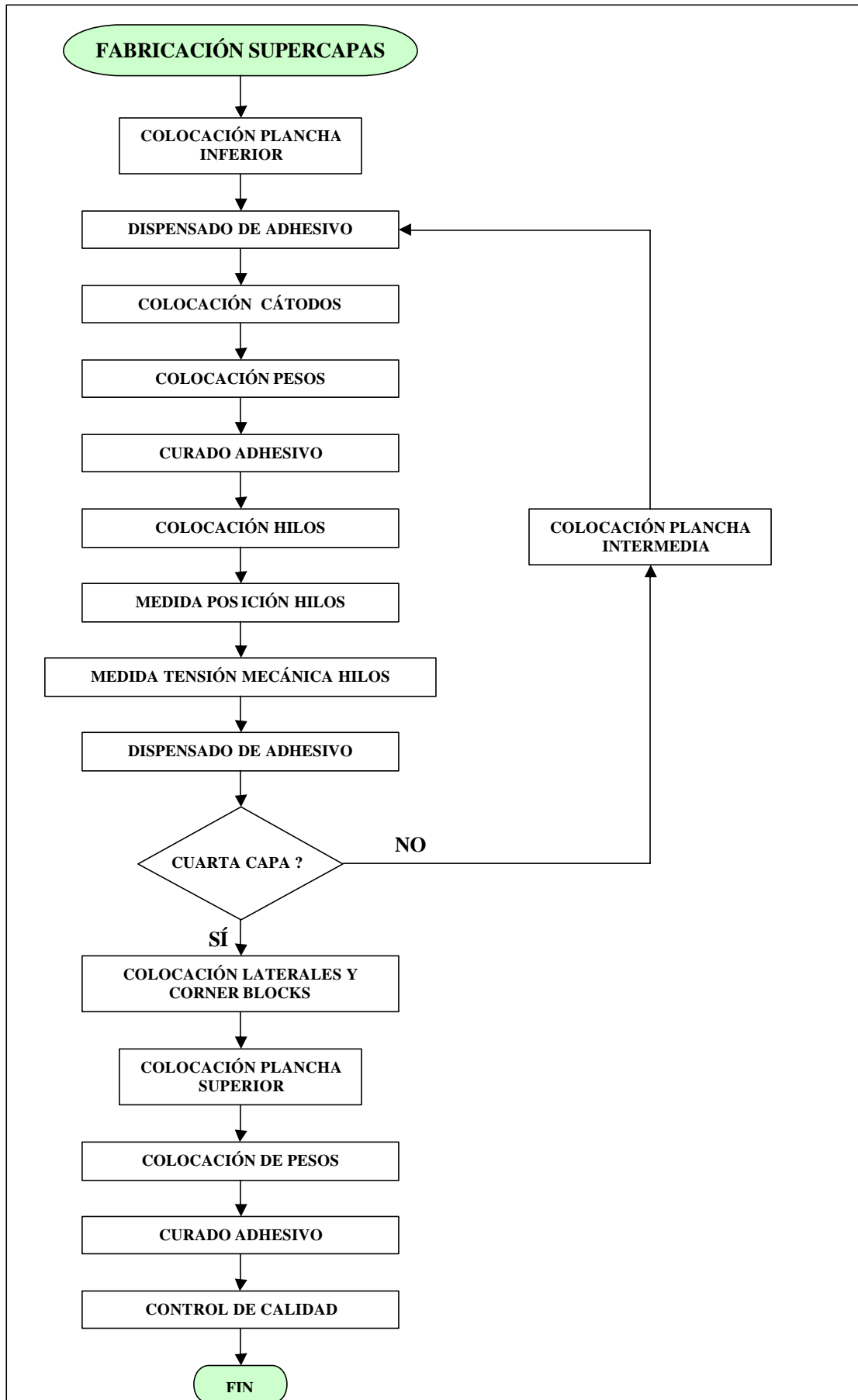


Figura 8.15.- Organigrama de la fabricación de supercapas

8.4.- CICLO DE FABRICACIÓN

Es el conjunto de operaciones que partiendo de una serie de componentes los transforma en un producto terminado [5]. A continuación se describen los componentes necesarios para la fabricación de las cámaras de deriva y la ejecución de su ciclo de fabricación.

8.4.1.- PRINCIPALES COMPONENTES

8.4.1.1.- PLANCHAS DE ALUMINIO

Por razones económicas, se eligieron planchas de aluminio de 1.5 mm de espesor en lugar de las utilizadas en los prototipos que eran de 2 mm. Este cambio implicaba una disminución de la rigidez de las cámaras, aunque suponía una disminución de su peso propio, no teniendo un efecto apreciable en su conjunto [6].

Las planchas tenían cintas aislantes de Mylar de 100 μm de espesor y 23 mm de ancho adheridas a su superficie, sobre las que se habían pegado electrodos de aluminio conformadores del campo eléctrico, de 50 μm de espesor y 16 mm de ancho. Este ancho se modificó respecto al de los electrodos utilizados en los prototipos, que era de 14 mm, para optimizar la conformación del campo eléctrico [2].

Estas cintas estaban colocadas en una de sus caras, si se trataba de planchas exteriores de una supercapa; o en ambas caras, con alternancia de los electrodos de una cara respecto a la otra, si eran planchas interiores de la misma.

La distribución de estos electrodos en las planchas era la que se observa en la figura 8.16. Los parámetros indicados se reflejan numéricamente en las tablas 8.2 y 8.3, para planchas utilizadas en la fabricación de supercapas P y Z respectivamente.

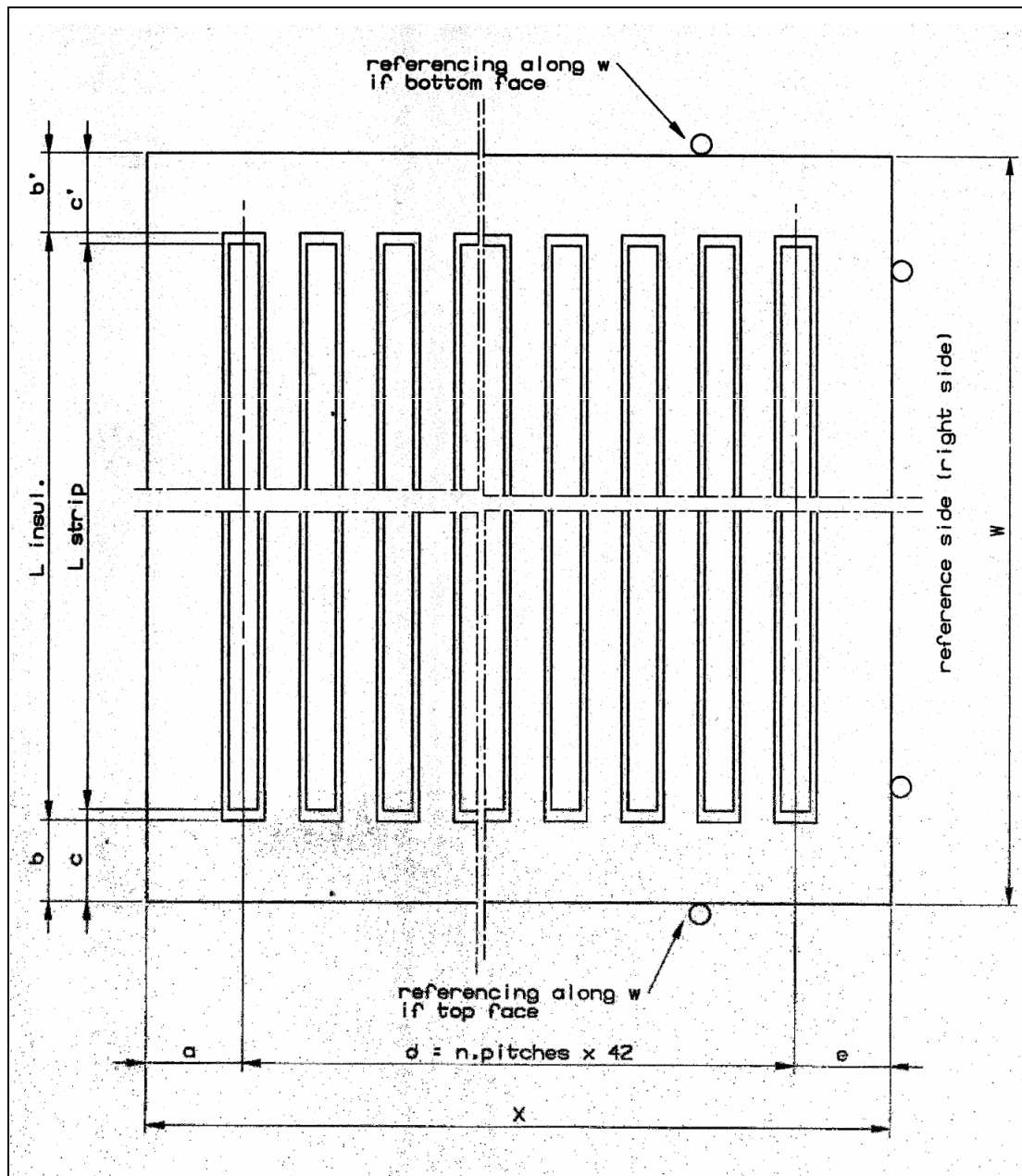


Figura 8.16.- Posición de los electrodos en las planchas

MB/Z/2/S – s.l. phi – Alum. plates dimensions and strips position																	
ITEMS 07 21X	Plates dimensions				Plates quantities												
	X		W	per s.l.		per chamber		overall									
	tolerance	+/-0.5	+/-0.5														
outer plates		2562	2487													notes	
		2562	2411														
inner plates																	
STRIPS	a		b	b'	L Insul.	c	c'	L strip	n. strips	n. pitches	d	e	notes				
	tolerance	+/-0.5	+0/-0.5	+0/-0.5	+1/-0	+/-0.5	+/-0.5	+/-1	per layer		+/-1	+/-1					
	BOTT. face	without strips															
Al-plate 07 211 (MB/Z/2/S/phi/plate1)	TOP face		52.5	44.5		2398	50.5		2386	59	58	2436	73.5				
	BOTT. face		52.5		6.5	2398		12.5	2386	60	59	2478	31.5	1 strip(s) useless			
Al-plate 07 212 (MB/Z/2/S/phi/plate2)	TOP face		31.5	6.5		2398	12.5		2386	60	59	2478	52.5				
	BOTT. face		31.5		6.5	2398		12.5	2386	60	59	2478	52.5				
Al-plate 07 213 (MB/Z/2/S/phi/plate3)	TOP face		52.5	6.5		2398	12.5		2386	60	59	2478	31.5				
	BOTT. face		52.5		6.5	2398		12.5	2386	60	59	2478	52.5				
Al-plate 07 214 (MB/Z/2/S/phi/plate4)	TOP face		31.5	6.5		2398	12.5		2386	60	59	2478	52.5	1 strip(s) useless			
	BOTT. face		31.5		6.5	2398		12.5	2386	60	59	2478	52.5				
Al-plate 07 215 (MB/Z/2/S/phi/plate5)	TOP face		73.5		44.5	2398		50.5	2386	59	58	2436	52.5				
	BOTT. face		73.5		44.5	2398		50.5	2386	59	58	2436	52.5				
	without strips																
	per s.l.																
strips to be layed down	478																
mylar quantity [m]	1146.24																
al. strip quantity [m]	1140.51																

Tabla 8.2.- Valores numéricos del posicionado de electrodos en planchas P

MB/Z/2/S – s.l. theta – Alum. plates dimensions and strips position																	

Tabla 8.3.- Valores numéricos del posicionado de electrodos en planchas Z

Cada supercapa estaba compuesta de cinco planchas, tres intermedias o interiores y dos exteriores, ambos tipos con la misma anchura (X) y distinta longitud (W). Sus dimensiones eran diferentes para supercapas P o Z (tabla 8.4) y su colocación en las mesas de precisión era respecto al sistema de referencia de la figura 8.17 (OXW).

PLANCHAS	DIMENSIONES CAPA P		DIMENSIONES CAPA Z	
	X	Y	X	Y
TOLERANCIAS	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5
PLANCHAS EXTERIORES	2562	2487	2457	2609
PLANCHAS INTERIORES	2562	2411	2457	2533

Tabla 8.4.- Dimensiones de las planchas en milímetros

Las planchas de aluminio, de producción industrial, fueron preparadas y cortadas con las dimensiones adecuadas en el INFN de Turín. Posteriormente, enviadas al LPP de Dubna, donde se les colocaron las bandas adhesivas de Mylar y sobre ellas los electrodos de aluminio (strips). Su resistencia a alta tensión fue comprobada con una alimentación en aire de hasta 4 kV, sustituyendo los electrodos defectuosos que no superaron esta prueba.

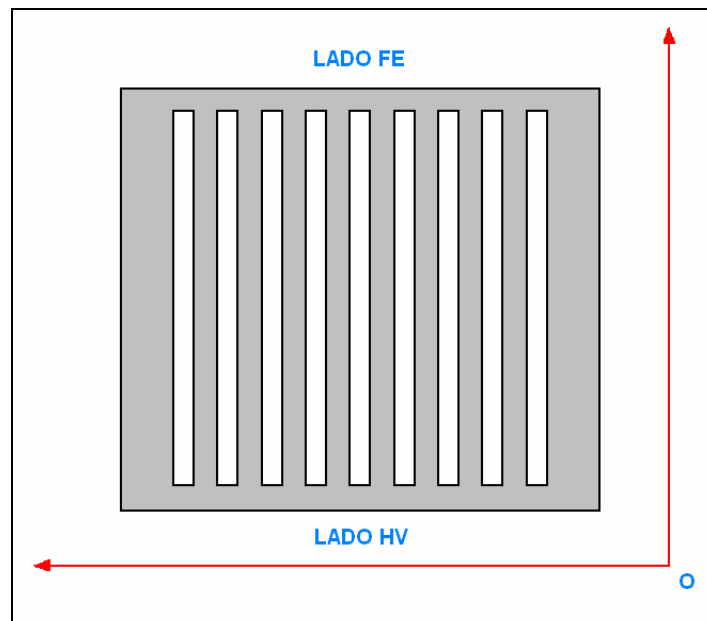


Figura 8.17.- Sistema de referencia y denominación de los lados de las planchas

Las planchas eran distribuidas regularmente entre los centros responsables de la fabricación. En la figura 8.18 se ven las planchas colocadas en su almacenamiento en la nave de montaje del CIEMAT. Se pueden observar varias planchas de aluminio con sus electrodos, en posición vertical sobre la estructura soporte.



Figura 8.18.- Almacenamiento de planchas de con capacidad para 700 unidades

8.4.1.2.- VIGAS CATÓDICAS

Tras los cálculos teóricos y ensayos de rotura, realizados sobre maquetas de cámara de deriva (figuras 8.19 y 8.20) en el INFN de Padua (Legnaro) [6], se hizo la recomendación, asumida por la Colaboración, de eliminar de los cátodos los aislantes de Lexan colocados sobre sus alas y utilizados en los prototipos.

Los ensayos realizados en dos de estas maquetas, una con aislantes de lexan en las vigas y otra con las vigas directamente pegadas a las planchas de aluminio, determinaron que en la primera se observaba al cabo del tiempo (3 semanas) un apreciable deslizamiento de los aislantes sobre las vigas y de éstos sobre las planchas de aluminio, lo que determinaba una debilidad mecánica.

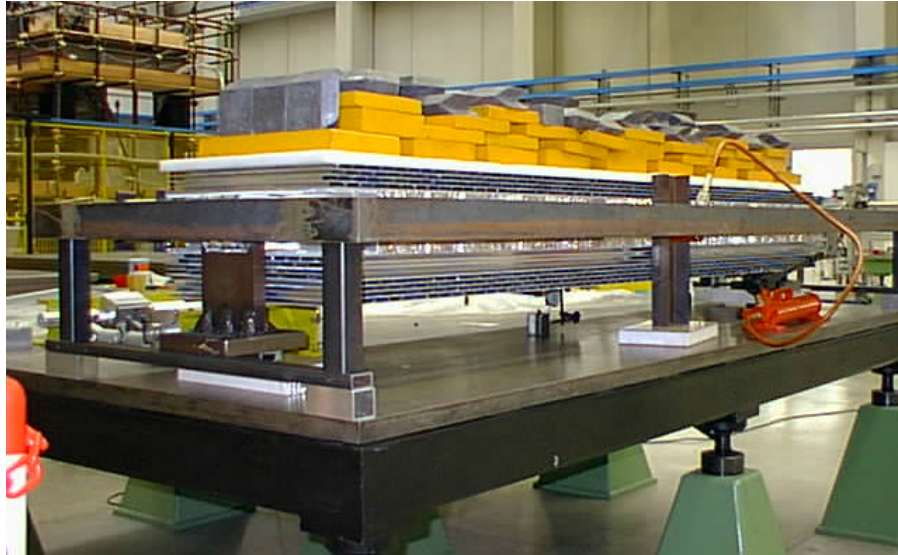


Figura 8.19.- Dispositivo utilizado para ensayos de rotura en Legnaro

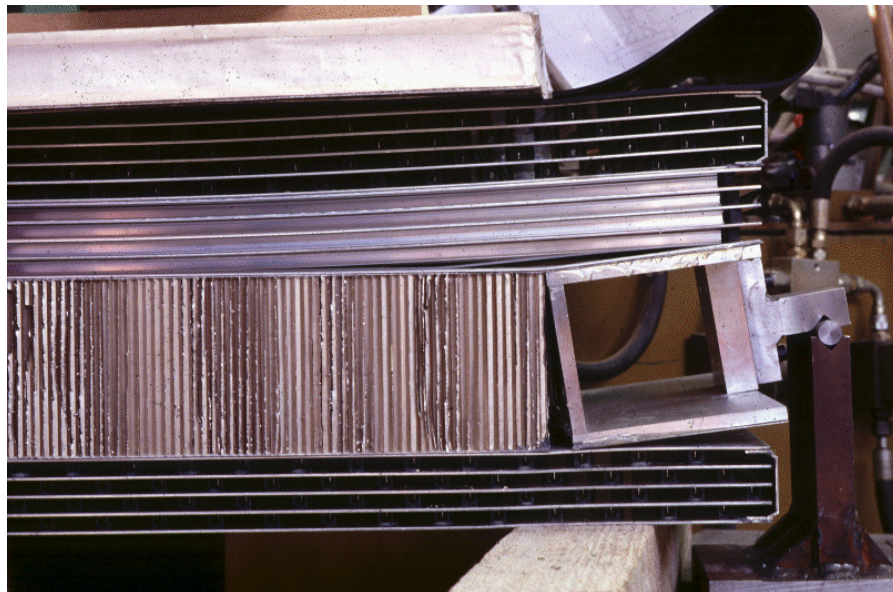


Figura 8.20.- Maqueta tras un ensayo de rotura

Como consecuencia de los resultados obtenidos en estas pruebas, se realizó un nuevo diseño de las vigas. El diseño de las nuevas vigas, que se adherían directamente a las planchas de aluminio, permitió aumentar el ancho de las alas con el consiguiente incremento de la superficie de adhesión, y reducir a la mitad el número de elementos

pegados, aumentando, por consiguiente, la resistencia mecánica de las cámaras de deriva así construidas [2].

En la figura 8.21 se muestra un esquema de la nueva viga, que tiene adheridos a ambos lados del alma una cinta autoadhesiva de aluminio (nuevo cátodo), de 0.05 mm de espesor y 11.5 mm de ancho. Esta cinta estaba aislada de la viga por una banda de Mylar autoadhesiva, de 0.1 mm de espesor y 19 mm de anchura.

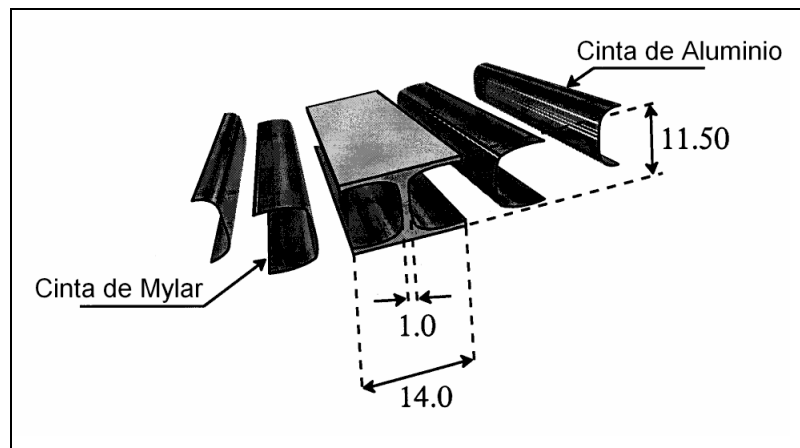


Figura 8.21.- Perspectiva de montaje de una viga catódica

Las vigas catódicas fueron preparadas en el IEHP de Protvino con instrumental desarrollado en el INFN de Bolonia y con una técnica similar a la empleada en el LPP de Dubna. Se cortaban a la longitud adecuada a cada tipo de capa, distinguiéndose dos tipos de vigas, las vigas P y las vigas Z de longitud en mm:

$$L_{VP} = 2368^{+0}_{-0.4}$$

$$L_{VZ} = 2490^{+0}_{-0.4}$$

Posteriormente, las bandas de aislante (Mylar) y los electrodos eran adheridos a sus paredes interiores. Por último, las vigas eran sometidas a tests de alto voltaje en aire y gas.

Por otra parte, las vigas de aluminio en las superficies exteriores de sus alas tenían dos ranuras para absorber el exceso de adhesivo dispensado, así como marcas

longitudinales que las identificaban con el orificio, de los ocho del molde, por las que habían sido extruídas.

Las vigas, al igual que las planchas de aluminio, eran distribuidas regularmente entre los centros de fabricación. La figura 8.22 muestra su almacenamiento en la nave del CIEMAT, y el detalle de una de ellas.

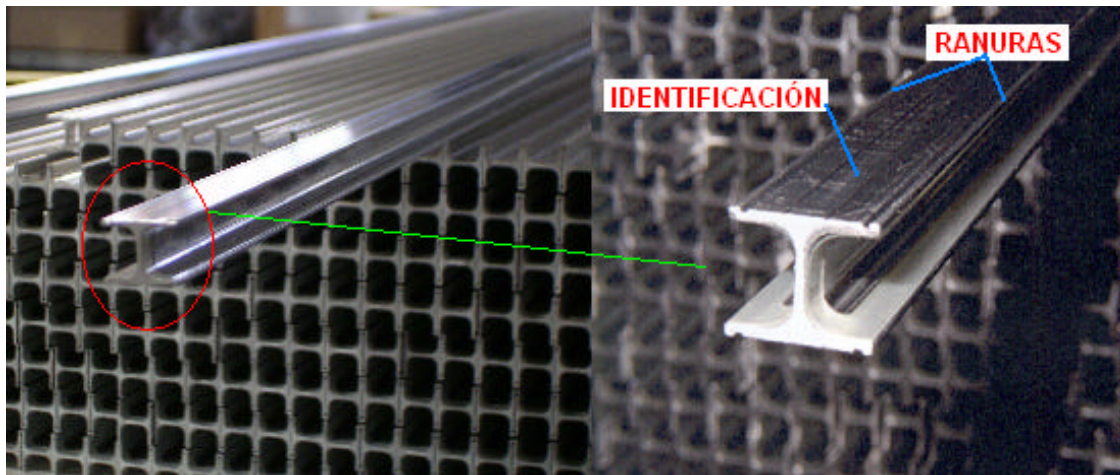


Figura 8.22.- Almacenamiento de cátodos y detalle de uno de ellos

8.4.1.3.- HILOS ANÓDICOS

Los hilos anódicos, de 0.050 mm de diámetro, fueron elaborados de forma industrial y suministrados a los diferentes centros de fabricación, al comienzo de la producción, en bobinas de 5750 m. Los hilos, de acero inoxidable, estaban recubiertos de oro para aumentar su conductividad eléctrica; y se preparaban y cortaban de forma automática a la longitud adecuada para cada tipo de capa, con una máquina específica desarrollada por el RWTH de Aquisgrán (figuras 8.23 y 8.24). Las longitudes de los hilos eran para las cámaras P y Z en mm:

$$L_{HP} = 2379^{+0}_{-0.5}$$

$$L_{HZ} = 2501^{+0}_{-0.5}$$



Figura 8.23.- Máquina automática para la preparación de hilos anódicos

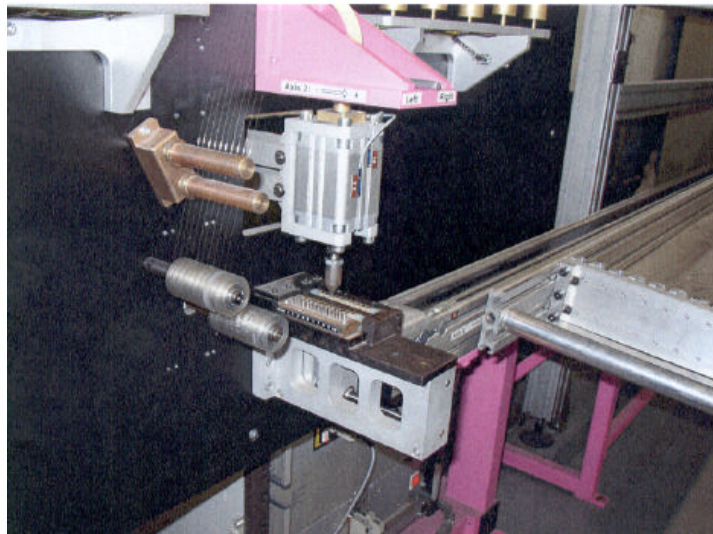


Figura 8.24.- Detalle de la máquina de preparación de hilos anódicos

El proceso de preparación de cada hilo consistía en atenazar un extremo a un bloque cúbico de 4 mm de lado (figura 8.25). Este bloque, de una aleación de cobre-teluro, tenía en una de sus caras, y de lado a lado, una ranura de 0.1 mm de ancho y 0.3 mm de profundidad (figura 8.26). Dentro de ella se colocaba el hilo, que quedaba sujeto al bloque cuando el material del mismo, próximo a la ranura y en un 70% de su longitud, se

deformaba mediante el accionamiento de un pequeño cabezal de estampado, aprisionándolo (figura 8.27).

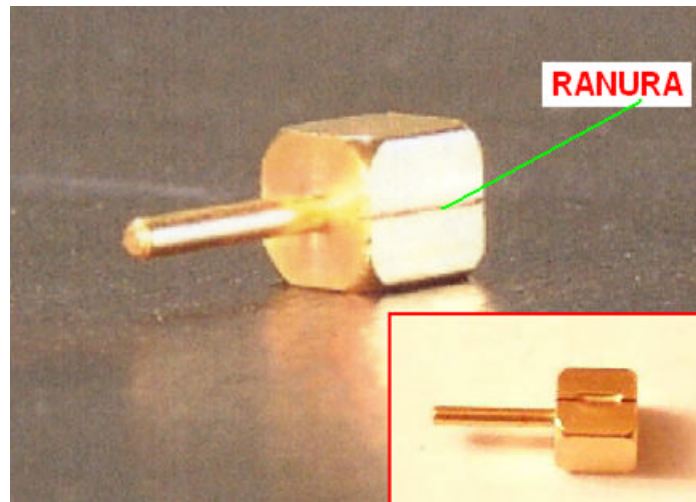


Figura 8.25.- Bloque de cobre-teluro en el que se insertan los hilos

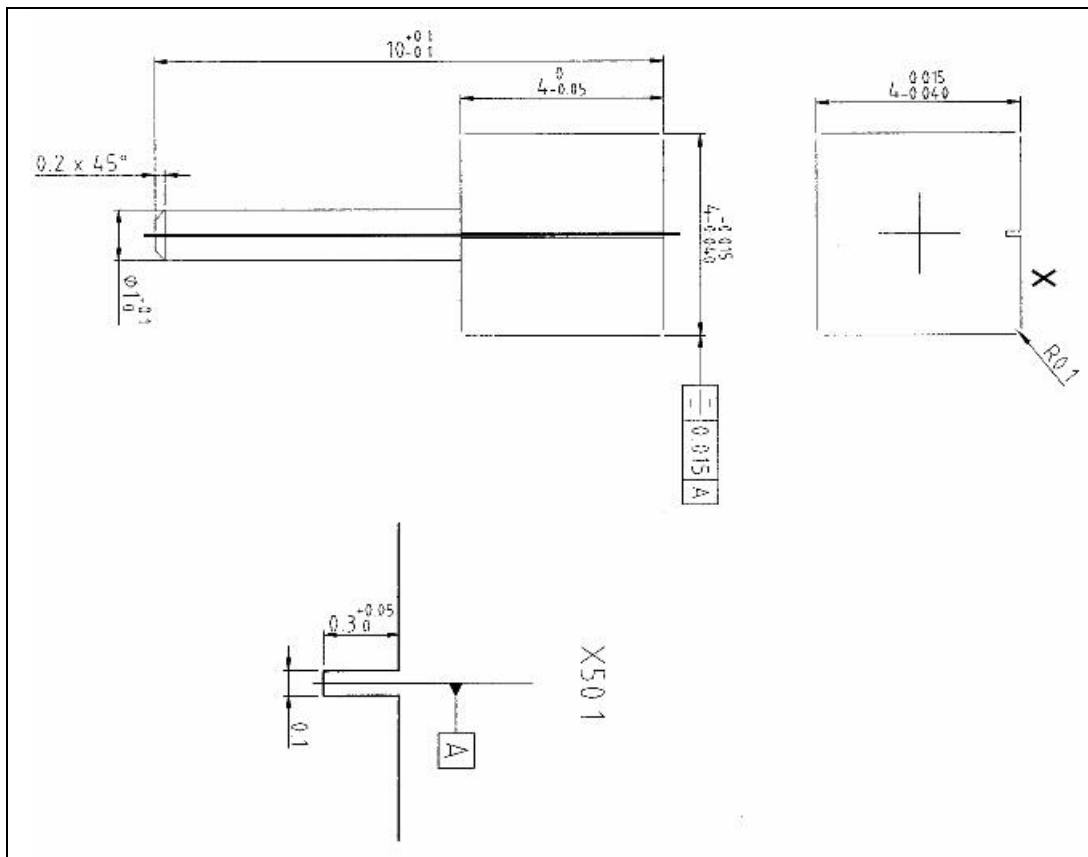


Figura 8.26.- Dimensiones del bloque de cobre-teluro

La inserción se realizaba de modo que la salida del hilo quedaba en la dirección contraria a un elemento cilíndrico (pin) de 1 mm de diámetro, que tenía el bloque en una de las caras perpendiculares a la ranura; por este pin se conectaba el hilo a la alta tensión de trabajo (3600 V) y se extraía la señal. Una vez atenazado, se cortaba el hilo a ras en la cara del bloque opuesta al pin, manteniendo la tensión mecánica proporcionada por la máquina (figura 8.28).

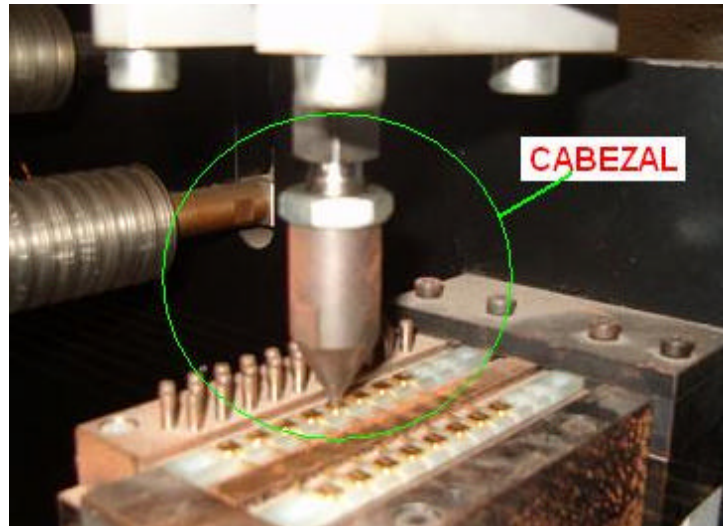


Figura 8.27.- Cabezal de estampado de la máquina de hilos

A continuación se desplazaba automáticamente el cabezal, aprisionando de igual forma el hilo en otro bloque idéntico, situado a una distancia igual a la longitud necesaria para cada tipo de cámara. El hilo, con un bloque atenazado en cada extremo, quedaba así, listo para su utilización en la producción [7].



Figura 8.28.- Cortado del hilo anódico

8.4.1.4.- POSICIONADORES DE HILOS (END-PLUGS)

Eran piezas de plástico, fabricadas industrialmente por inyección, estaban cargadas con fibra de vidrio para lograr su estabilidad mecánica tras este proceso; su función era el correcto posicionado de los hilos sobre las planchas de aluminio.

El posicionado del hilo se llevaba a cabo mediante dos piezas, una fija y otra móvil (figura 8.29).

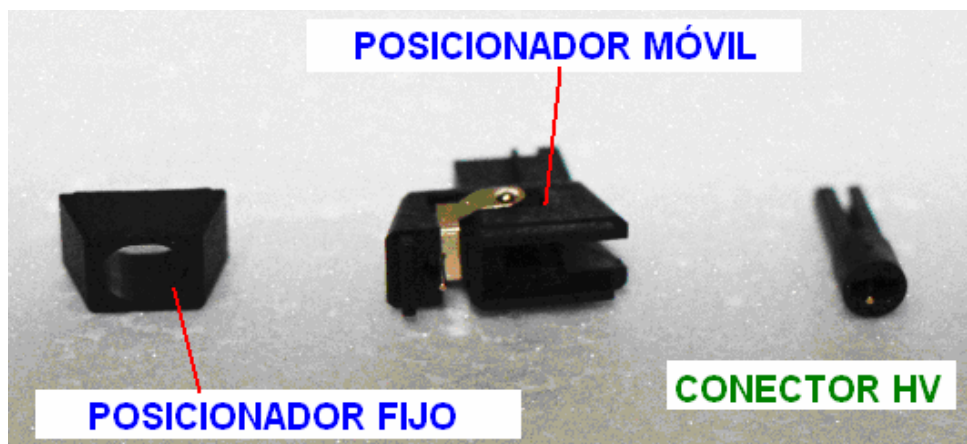


Figura 8.29.- Piezas para el posicionado de hilos y conector de alta tensión (HV)

El posicionador fijo, como se verá más adelante, era una pieza prismática colocada por un útil delante de cada extremo de la viga, con una precisión mejor que 0.1 mm. En esta pieza se inserta el conector que suministra alta tensión a la viga (figura 8.30).

El posicionador móvil era una pieza de mayor complejidad, que se colocaba manualmente apoyada entre dos posicionadores fijos (figura 8.31). El molde para la fabricación en serie de ambos posicionadores garantizaba una tolerancia máxima de 20 μm en todas sus dimensiones.

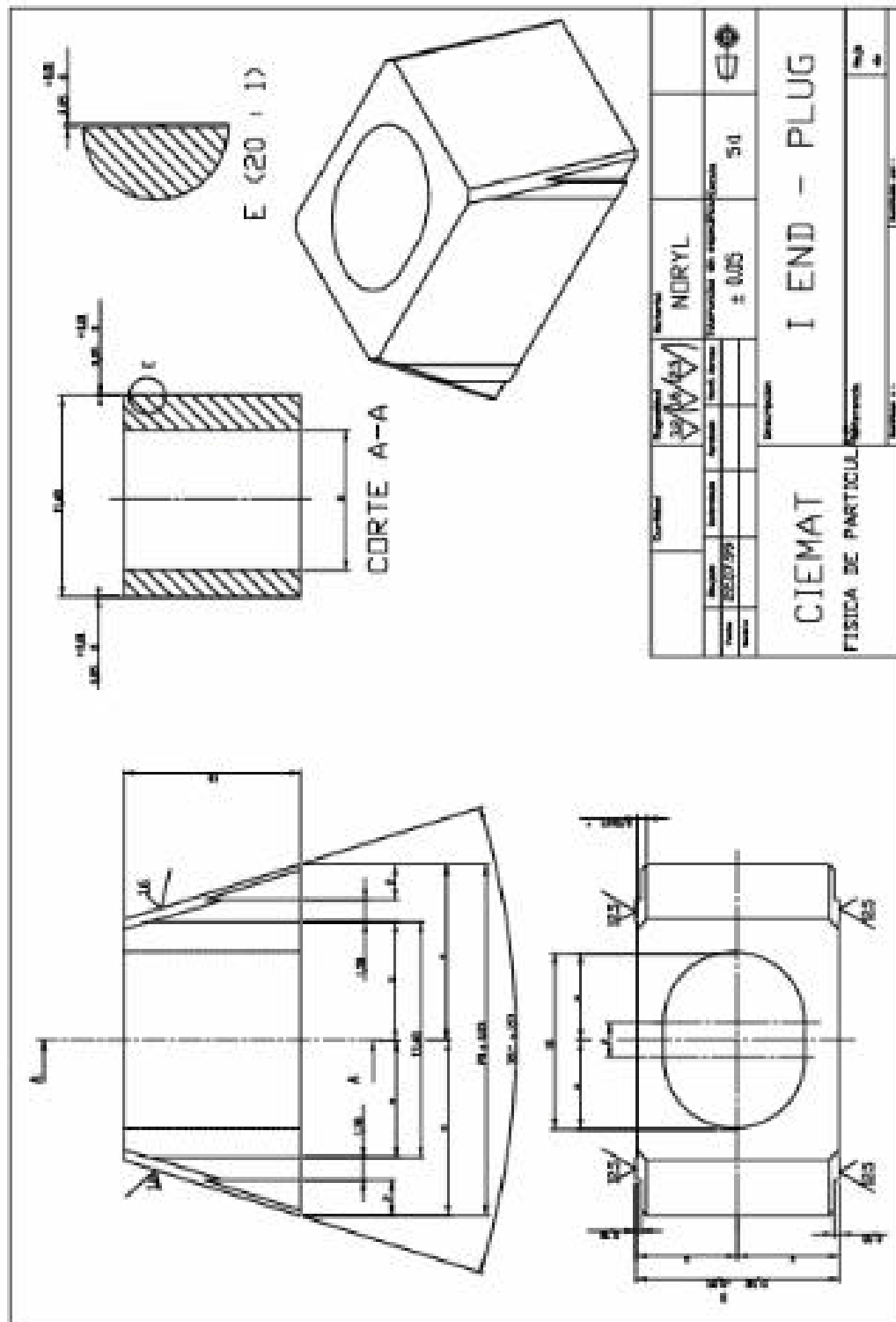


Figura 8.30.- Posicionador fijo de hilos

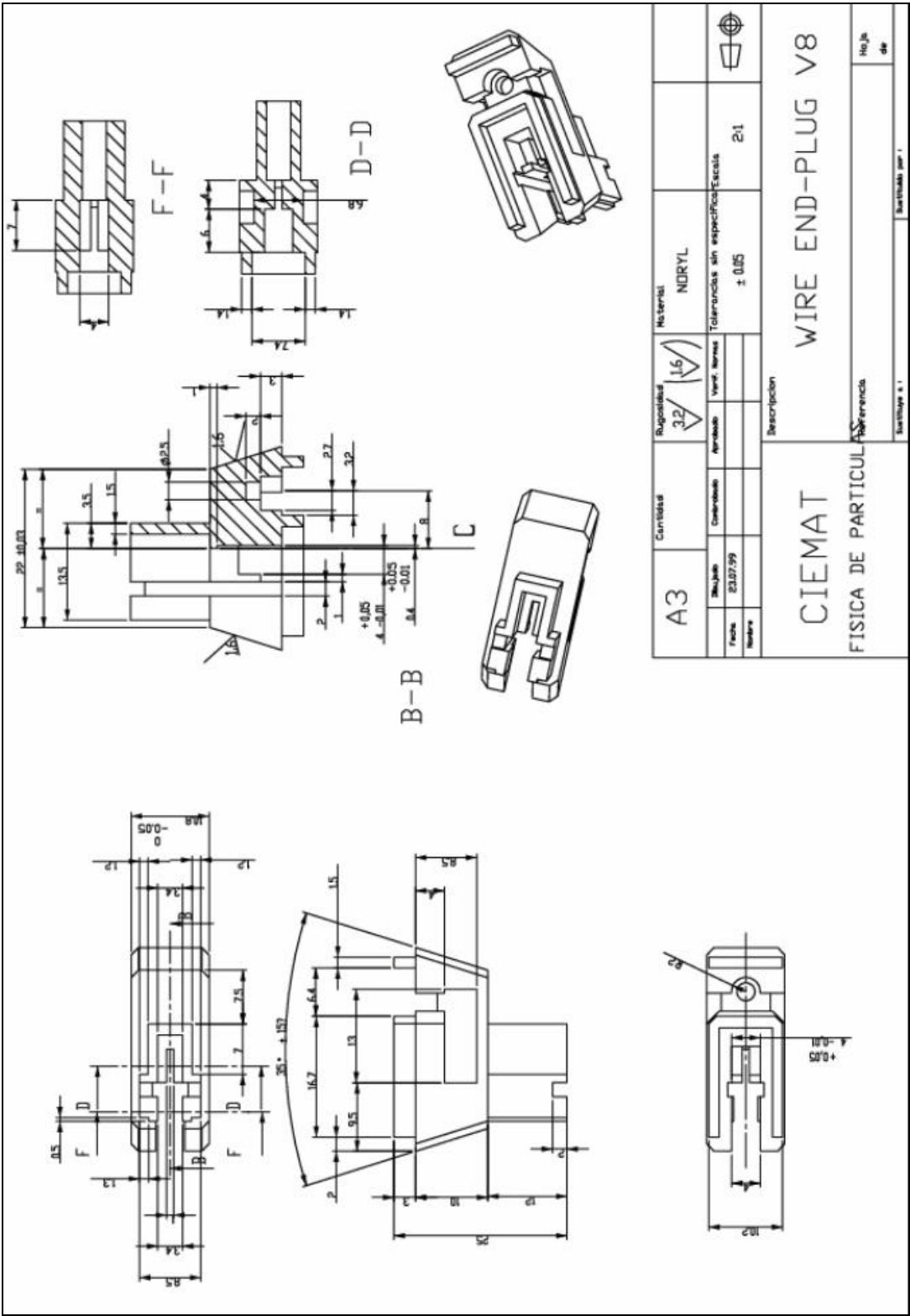


Figura 8.31.- Posicionador móvil de hilos

Estas piezas fueron fundamentales en el proceso de fabricación de las cámaras de deriva, ya que de ellas dependía la correcta colocación de los hilos anódicos en el centro de

los tubos de deriva. Los posicionadores móviles, dos por tubo, uno en cada uno de sus extremos, alojaban los bloques de cobre-teluro donde iban atenazados los hilos anódicos. El diseño preciso de estos componentes de plástico (noryl) era imprescindible para garantizar el correcto centrado y tensado de los hilos anódicos (figura 8.32).

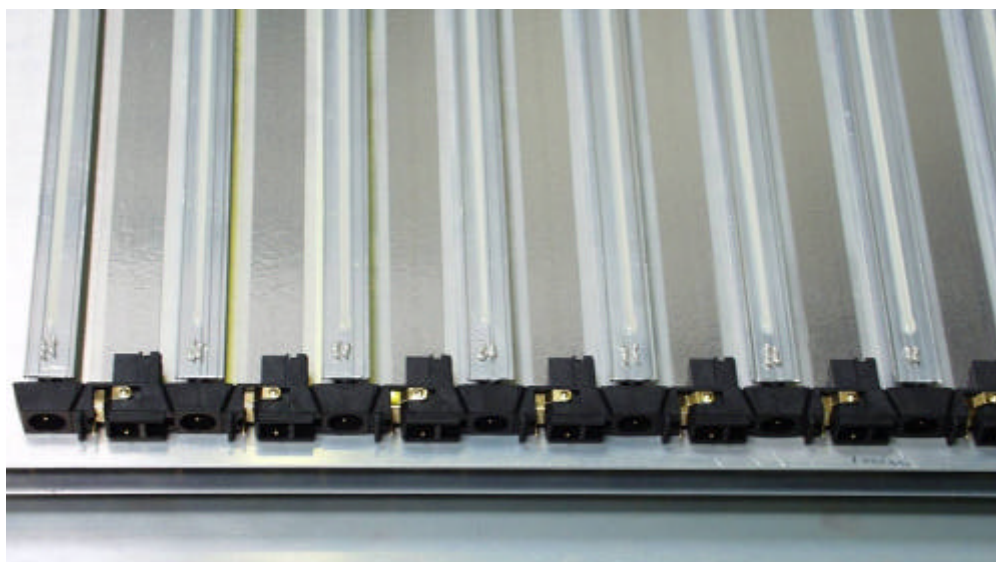


Figura 8.32.- Disposición de los posicionadores de hilos en una capa

El centrado de los hilos era necesario para la conformación correcta del campo eléctrico en la celda de deriva, garantizando, por tanto, el buen funcionamiento de la misma. El diseño de esta pieza fue asumido por toda la Colaboración, cuyos grupos participantes idearon prototipos de la misma, que fueron contrastados con posterioridad. El grupo de diseño del CIEMAT, tuvo un papel destacado en el diseño final, aportando varias de las características que llevaron a la pieza definitiva.

La influencia del centrado de los hilos anódicos en la distribución uniforme del campo eléctrico en las celdas de deriva, fue determinada por simulación, mediante el programa GARFIELD [8]. Este programa, que simula de forma detallada cámaras de deriva en dos y tres dimensiones, permitió evaluar el campo eléctrico en cualquier punto de las celdas de deriva, obteniéndose teóricamente la tolerancia máxima admitida en su posición. Un desplazamiento vertical del hilo (flecha) de hasta 500 μm , mantenía la amplitud del pulso obtenido en valores aceptables para el correcto funcionamiento de la celda (figura 8.33).

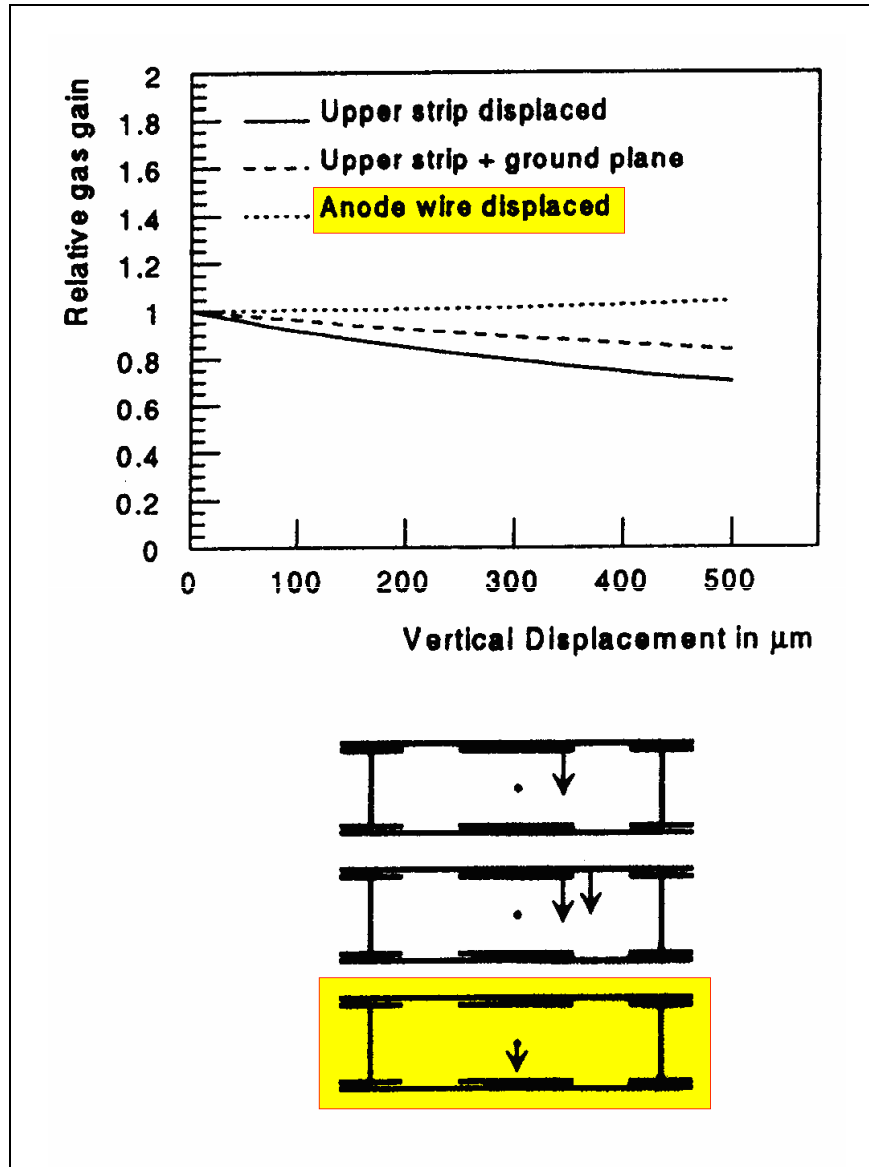


Figura 8.33.- Influencia del desplazamiento del hilo anódico sobre el pulso

La colocación precisa de los posicionadores móviles requería una inserción muy precisa de los posicionadores fijos en los que se apoyan. La pieza definitiva, una vez probada satisfactoriamente en el prototipo Q4, es la mostrada en los planos de las figuras 8.30 y 8.31. En la figura 8.34 se aprecian los elementos (aristas) más significativos; y, en detalle, el alojamiento de un bloque de cobre-teluro con el hilo anódico atenazado.

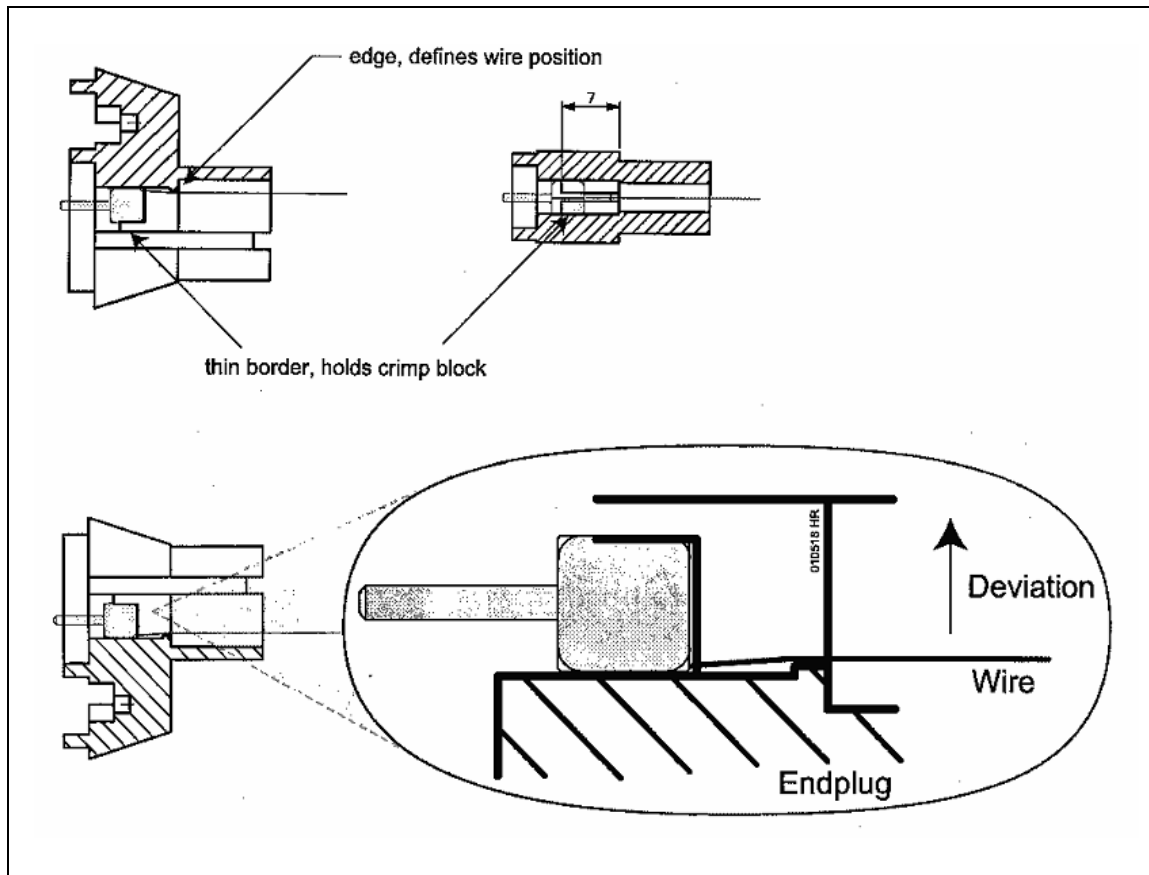


Figura 8.34.- Conjunto bloque-posicionador móvil

8.4.1.5.- PANEL RIGIDIZADOR (HONEYCOMB)

Los paneles rigidizadores suministrados [9] pasaron un riguroso control de calidad tras su fabricación. Los parámetros fundamentales de estos paneles para formar parte de la estructura de una cámara de deriva eran: el espesor y la planitud en ambas caras del mismo. La planitud tenía que tener el mismo valor que el exigido a las caras de las supercapas (≤ 1 mm) en toda su superficie.

Las tolerancias en las dimensiones básicas del panel (figura 8.35) eran:

Espesor: $T = \pm 0.5$ mm

Longitud: $L = (+1, -2)$ mm

Anchura: $W = \pm 2$ mm

Diferencia entre diagonales: $D_d \leq 3$ mm

Los valores nominales del espesor, la longitud y la anchura para cámaras MB1, MB2 y MB3 eran:

$$T = 128.5 \text{ mm}$$

$$L = 2488 \text{ mm}$$

$$W = 2458 \text{ mm}$$

Y para las cámaras MB4:

$$T = 180.5 \text{ mm}$$

$$L = 2488 \text{ mm}$$

$$W = 2458 \text{ mm}$$

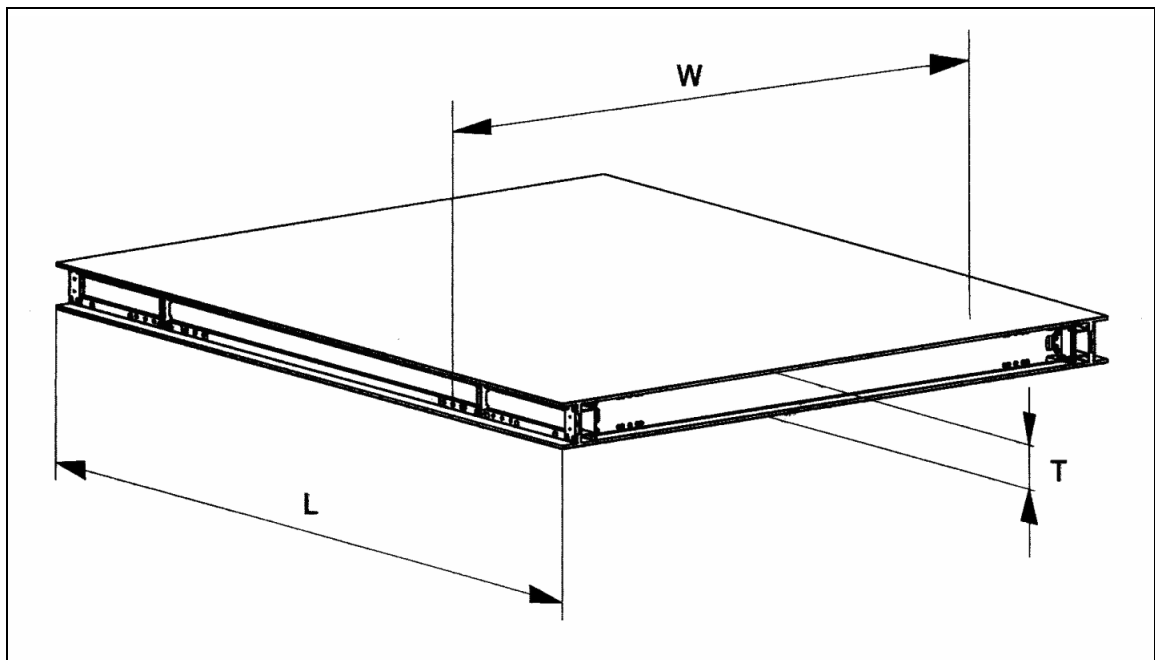


Figura 8.35- Dimensiones del panel rigidizador

8.4.1.6.- OTROS COMPONENTES

El resto de elementos necesarios para la fabricación, salvo los componentes electrónicos y algunas piezas metálicas estructurales para terminación y cierre de las supercapas de las cámaras, eran comerciales. Ese era el caso de los distintos tipos de adhesivos estructurales utilizados en el ensamblaje (araldit 2012), del adhesivo tixotrópico

empleado en el sellado de los perfiles laterales (araldit 2013) [10], y del pegamento conductor (E-Solder 3025) [11].

8.4.2- FABRICACIÓN

La unidad fundamental para la fabricación de una supercapa es la capa. Cuando se superponen dos capas una de las planchas es común a las dos. La unidad estructural de cada capa es la celda de deriva. Cada capa, dependiendo de su pertenencia y su situación en el detector, ha de tener un número útil de celdas, determinado por la Colaboración, entre 56 y 60 en MB2 y MB4.

8.4.2.1.- ETAPAS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE UNA CAPA

El proceso de fabricación de capas propuesto en esta tesis, y que fue aplicado en el centro de producción del CIEMAT (figura 8.36), constó de siete etapas que se describen con detalle a continuación. Estas etapas se realizaron en una de las mesas de precisión para fabricar supercapas. Enunciadas como modelo de fabricación, son las siguientes:

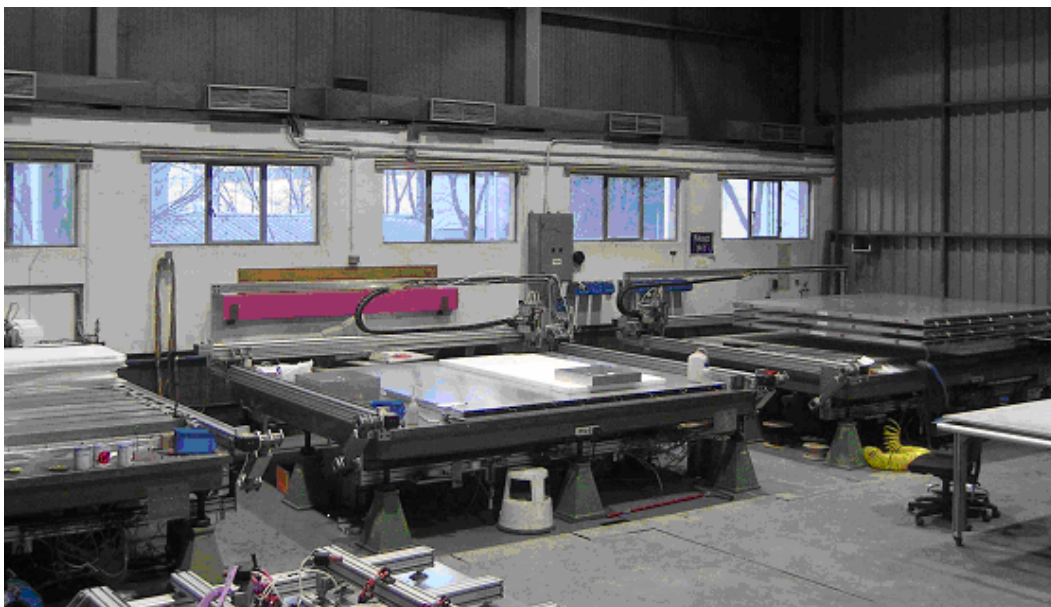


Figura 8.36.- Planta de fabricación del CIEMAT (Edificio 75A)

ETAPA 1.- POSICIONAMIENTO DE PLANCHA INFERIOR Y PREPARACIÓN DE ÚTIL DE PEGADO DE VIGAS

En primer lugar, deberá trasladarse con el transportador neumático (figura 8.37), una plancha inferior (con electrodos de aluminio por una sola cara), desde su lugar de almacenamiento, y colocarse sobre la mesa de precisión correspondiente (figura 8.38). Esta mesa deberá tener unas piezas de referencia mecanizadas de forma muy precisa, con una tolerancia en su posición de 0.2 mm, que garanticen el correcto posicionamiento de la plancha con respecto al sistema de referencia global de la misma (figura 8.39).

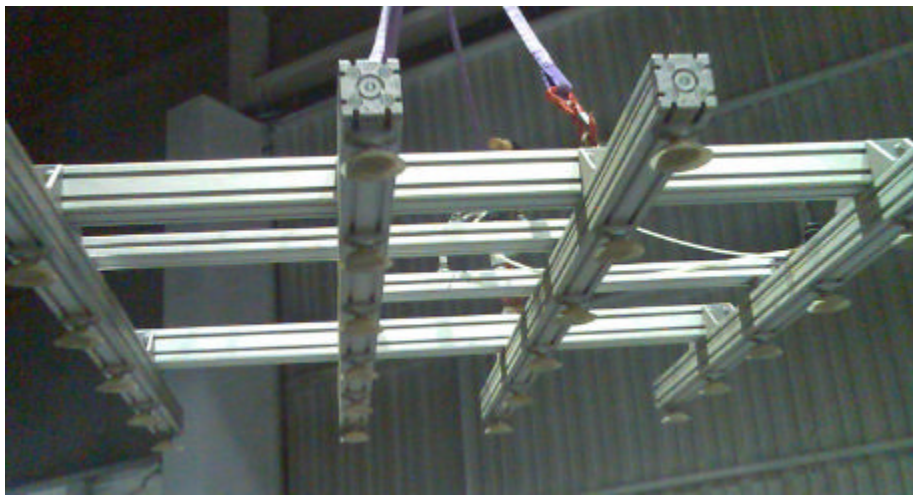


Figura 8.37.- Transportador neumático de planchas con ventosas de sujeción



Figura 8.38.- Plancha inferior colocada sobre la mesa de precisión

La dimensión de la plancha inferior en la dirección de los hilos será mayor que la longitud de los mismos, con objeto de delimitar el volumen necesario junto con la plancha superior para el alojamiento de los componentes electrónicos que se instalarán con posterioridad a la fabricación mecánica de cada capa.



Figura 8.39.- Posicionamiento de la plancha inferior

Simultáneamente a la operación anterior, las vigas catódicas, correspondientes a la primera capa, serán alojadas en un útil mecanizado con gran precisión (figura 8.40). Este útil también permitirá colocar correctamente los posicionadores fijos de hilos, piezas poliméricas (noryl) también denominadas end-plug de vigas, a ambos extremos de cada cátodo (figura 8.41).

Para asegurar que las distancias entre celdas sean constantes y correspondan a las especificadas, la precisión en el mecanizado del útil, en las ranuras que posicionan los cátodos y en los alojamientos que posicionan las piezas de plástico, será de 50 μm .

Esta característica del útil es fundamental [12], ya que las posiciones relativas entre hilos vendrán determinadas por dichas piezas.



Figura 8.40.- Útil de posicionado de cátodos

Para colocar el útil, posteriormente, sobre la mesa de pegado de forma precisa con una tolerancia mejor que 0.1 mm, éste tendrá dos barras de acero inoxidable, cilíndricas y calibradas de referencia, como la que se indica en la figura 8.41 [12].

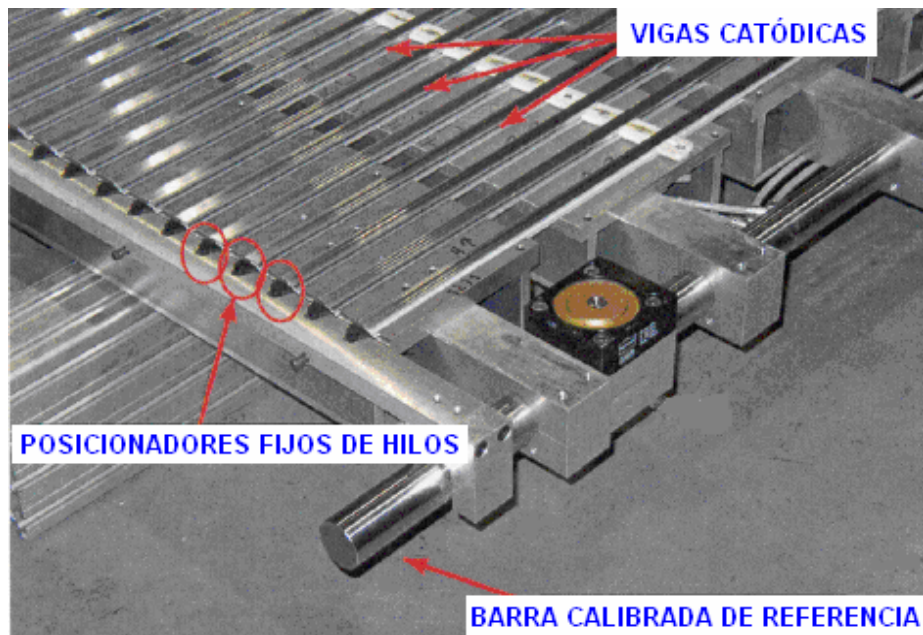


Figura 8.41.- Detalle del útil de posicionado de cátodos

ETAPA 2.- DISPENSADO DE ADHESIVO PARA PEGADO DE VIGAS EN PLANCHA INFERIOR

El dispensador acoplado al coordinatógrafo de la mesa de montaje (figura 8.42) suministrará cordones de adhesivo estructural (Araldit 2012) de espesor uniforme, entre los electrodos de la plancha inferior, para el pegado de las vigas catódicas. El dispensado del adhesivo se realizará mediante un movimiento alternativo en zig-zag, hasta recorrer la plancha en su totalidad (figura 8.43).

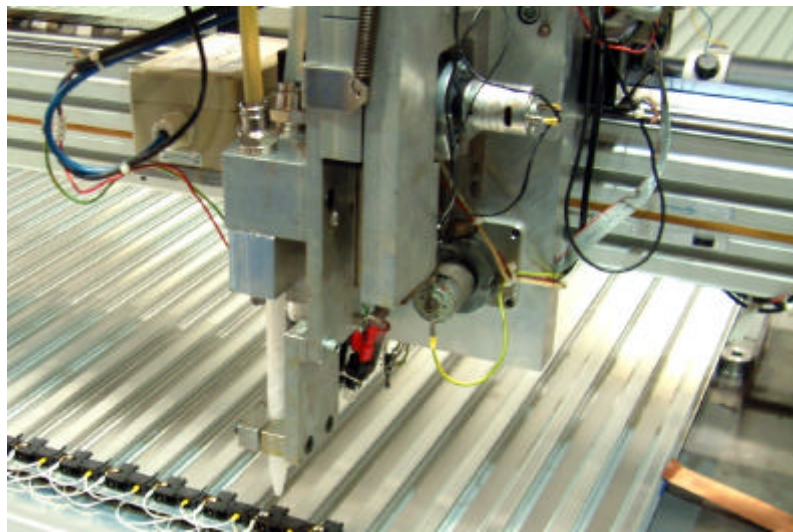


Figura 8.42.- Dispensador de adhesivo



Figura 8.43.- Dispensado de cordones de adhesivo

Se procurará que los cordones tengan pequeñas discontinuidades, dos por cada cordón de adhesivo, para poner en ellas manualmente una pequeña cantidad de pegamento conductor (E-Solder 3025), a fin de garantizar el contacto eléctrico entre los cátodos y la plancha (figura 8.44). Estas discontinuidades se obtendrán por enmascaramiento, con cinta de papel, en zonas próximas a los bordes de la plancha en la que se dispensan los cordones de adhesivo.

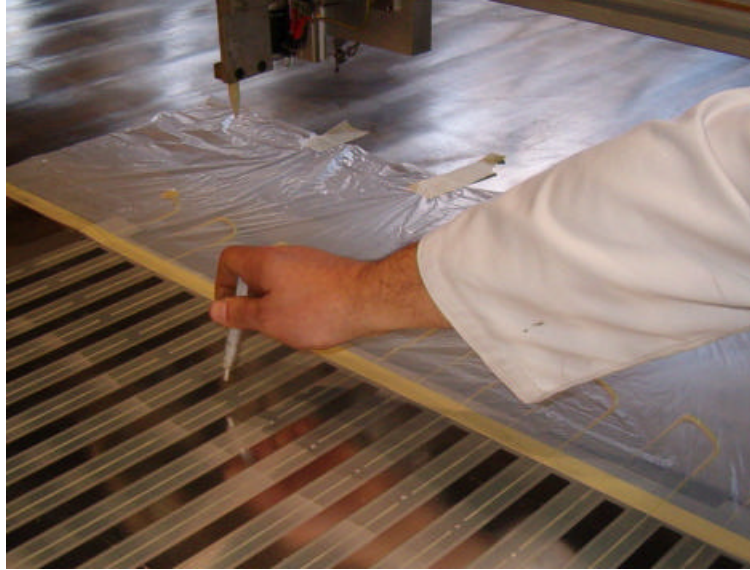


Figura 8.44.- Deposición de pegamento conductor tras retirar la cinta de papel

ETAPA 3.- COLOCACIÓN DE CÁTODOS SOBRE LA PLANCHA INFERIOR

Se volteará el útil de pegado de vigas catódicas (figura 8.45), colocándolo sobre la plancha inferior, tal como se muestra en la figura 8.46. Para efectuar el pegado de los cátodos en las posiciones correctas, la mesa de precisión contará con dos posicionadores de referencia muy precisos en forma de U [12], dentro de los cuales se insertará la barra calibrada del útil de pegado de cátodos. En la figura 8.46 se aprecia en primer plano el posicionador, situado en el origen del sistema de referencia de las capas.

Para asegurar la correcta adhesión de las vigas a la plancha, el útil permanecerá durante un mínimo de 12 h con pesos distribuidos sobre él (figura 8.47). El conjunto de pesos estará constituido por una estructura formada por perfiles ranurados de gran resistencia ($E= 70000 \text{ N/mm}^2$), tipo Bosch o similar, y soportará 88 bloques de hierro (F-

112) independientes (300 x 200 x 40 mm) de 20 Kg cada uno, con guías verticales para facilitar su colocación [12].

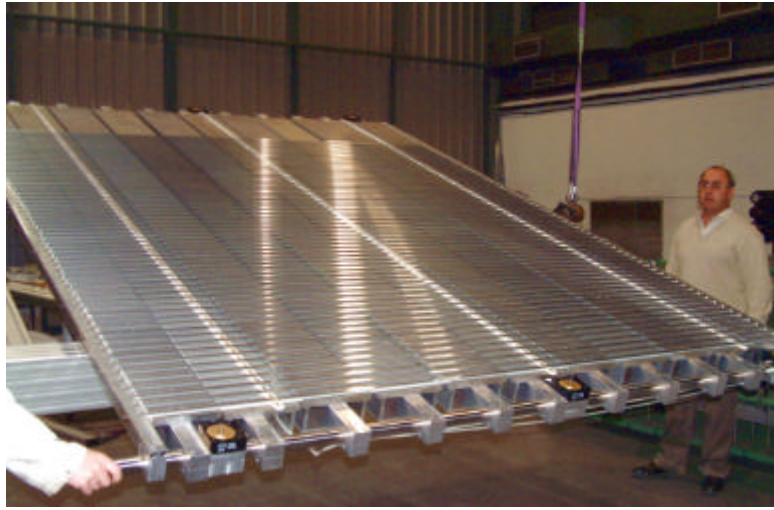


Figura 8.45.- Volteo del útil de pegado de vigas

El tiempo de curado del adhesivo a 20 °C, es de 12 horas, debiéndose realizar a temperatura controlada y nunca por debajo de 18 °C; el curado no estará garantizado a temperaturas inferiores a este valor [10]. Para asegurar la calidad de la adhesión se establecerá un período de curado de 24h, transcurrido el cual se pasará a la siguiente etapa.

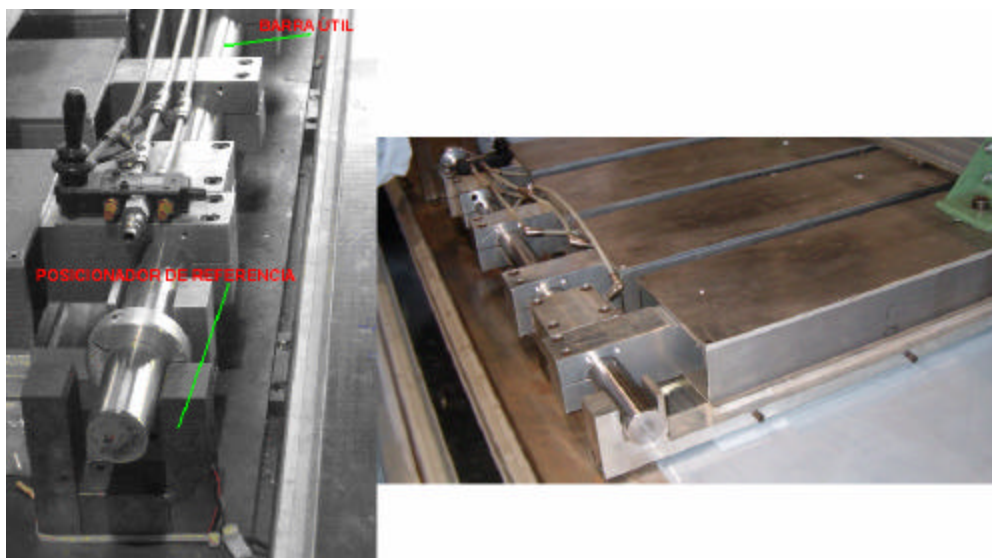


Figura 8.46.- Posicionamiento del útil en ambos extremos de la barra calibrada

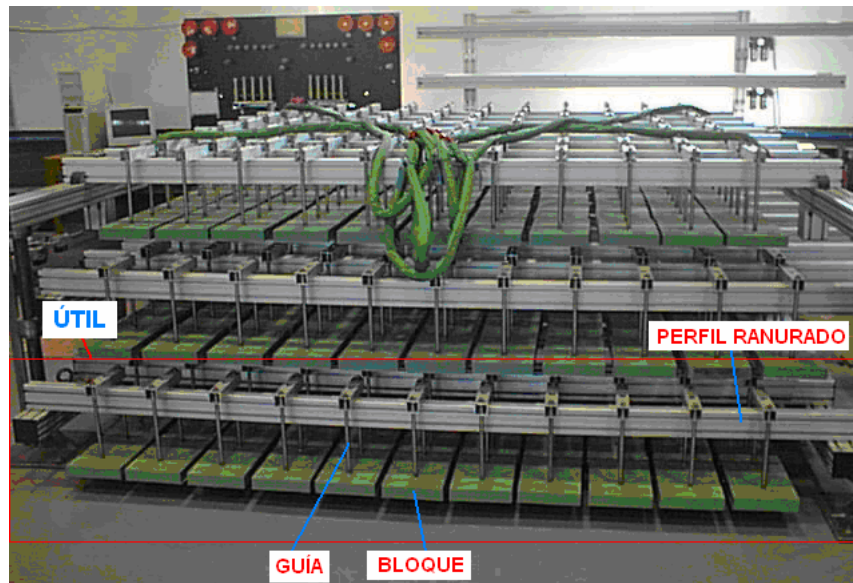


Figura 8.47.- Útil de pesos distribuidos

ETAPA 4.- COLOCACIÓN DE HILOS ANÓDICOS

Una vez retirado el útil de pesos y colocadas las vigas catódicas y las piezas portahilos fijas (figura 8.48), se procederá a la colocación de los todos los hilos de la celdas de deriva de la capa.

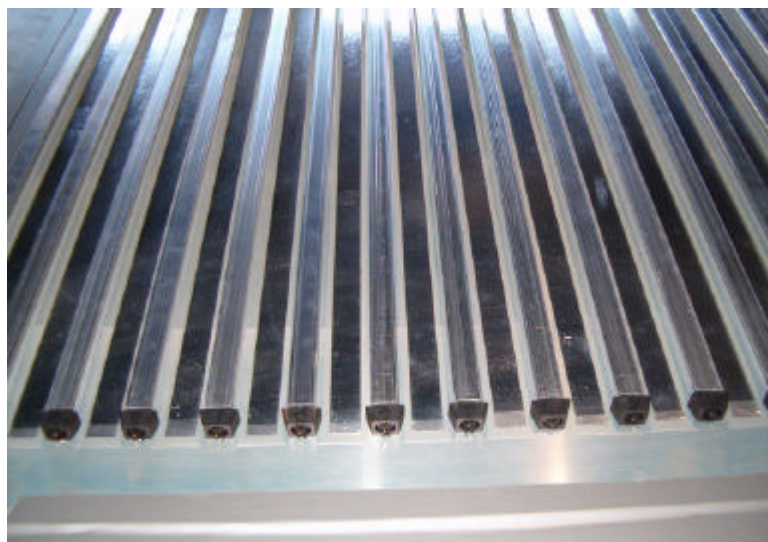


Figura 8.48.- Vigas y posicionadores fijos adheridos a una plancha

Los hilos anódicos, con los bloques de cobre-teluro en sus extremos, estarán almacenados de 10 en 10 unidades con las piezas de plástico utilizadas en el atezado, en unos contenedores metálicos diseñados específicamente para este fin y donde no estarán sometidos a tensión mecánica.

Estos grupos de hilos se transportarán manualmente a la mesa de precisión, se situarán paralelamente a las vigas catódicas; a continuación se extraerán uno a uno y se introducirán los bloques de cobre-teluro en los dos posicionadores móviles correspondientes a cada celda (figura 8.49).

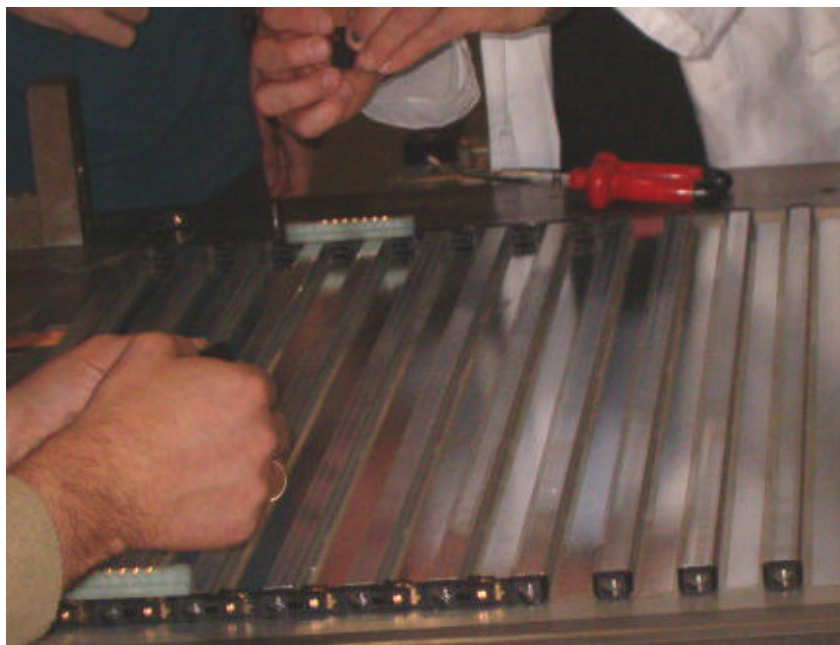


Figura 8.49.- Introducción de los bloques Cu-Te en los posicionadores móviles

A continuación, se colocará uno de los posicionadores móviles, apoyándolo entre los dos posicionadores fijos correspondientes al extremo de una celda, desplazando a continuación el otro, hasta colocarlo sobre los del extremo opuesto. Así, quedará el hilo sometido a la tensión mecánica de trabajo. Se repetirá todo el procedimiento hasta completar todas las celdas de la capa (figura 8.50).

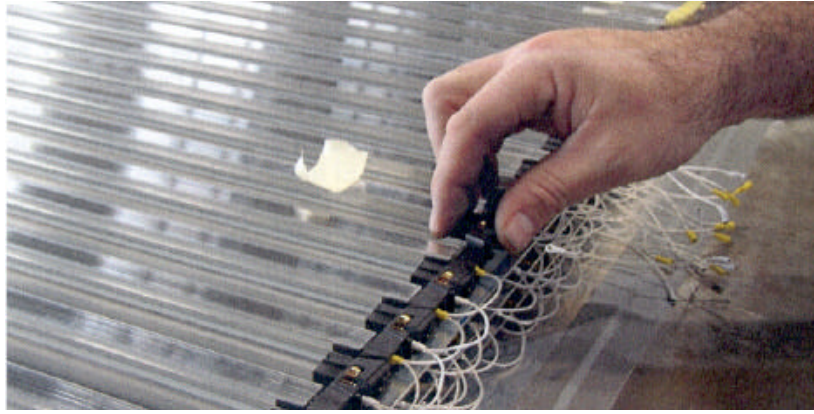


Figura 8.51.- Colocación de los hilos anódicos

En la figura 8.51 se muestra una recreación en una perspectiva explosionada, en la que se observa, además de las piezas utilizadas para el posicionamiento de los hilos, las que distribuyen la alta tensión a los distintos elementos de las celdas.

Los conectores de alta tensión serán piezas cilíndricas de plástico (noryl), como las que se ven en la parte inferior de la figura, y se introducirán en los posicionadores fijos, quedando sujetos al alma de la viga. Estos conectores HV llevarán insertados en su interior un resorte de bronce-fósforo, de 0.2 mm de espesor, a través del cual se suministrará alta tensión a ambas caras del alma de la viga catódica.

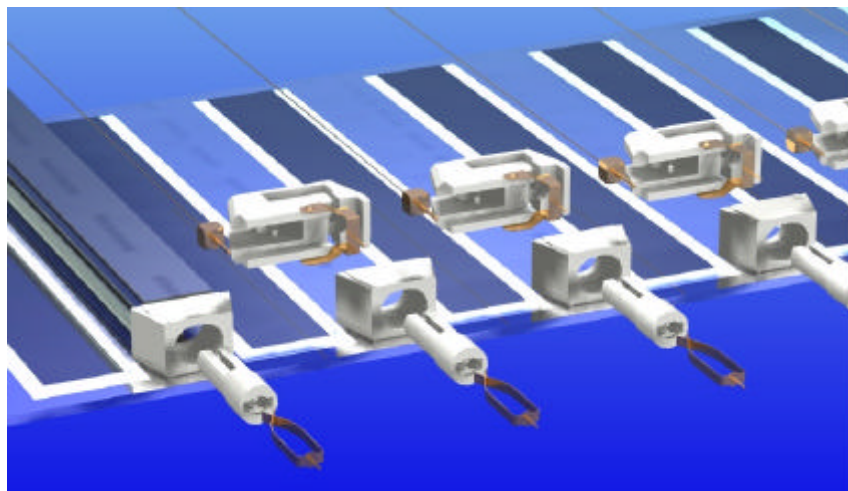


Figura 8.51.- Piezas posicionadoras de hilos y piezas distribuidoras de HV

Las piezas de la parte superior son los posicionadores móviles de hilos que, además de alojar al bloque de cobre-teluro, tienen un alojamiento en su interior donde se introducirá un resorte metálico. Este resorte tiene las mismas características del anterior y , además, un elemento cilíndrico (pin) de entrada para alimentación de los electrodos de aluminio inferior y superior de cada capa.

La recreación de la colocación final de las piezas posicionadoras móviles, se ve en la figura 8.52. En la figura 8.53 se aprecia la colocación real de los hilos anódicos.

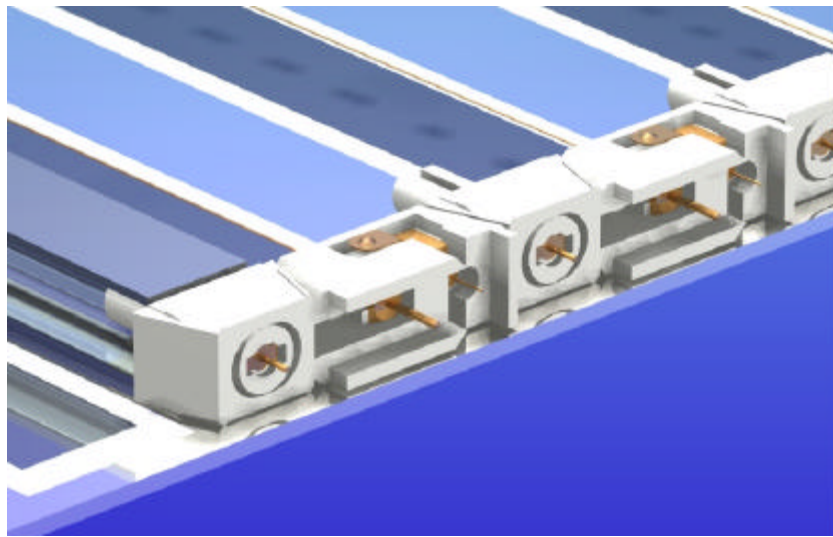


Figura 8.52.- Recreación de las piezas posicionadoras y de HV instaladas

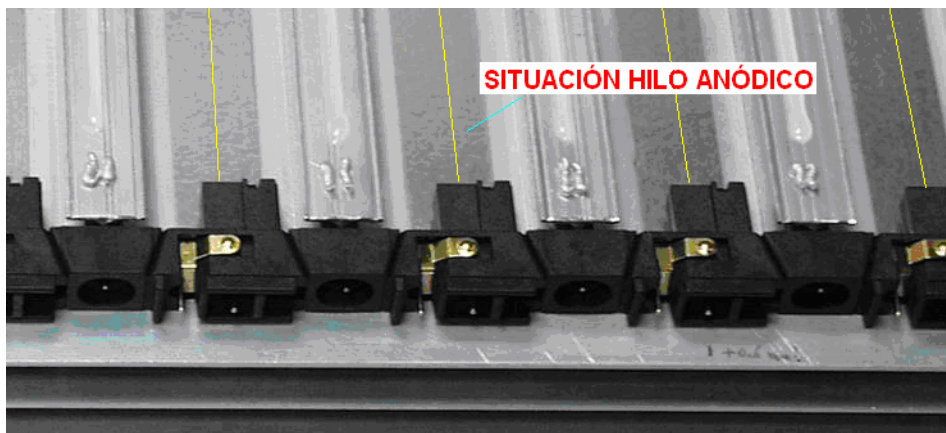


Figura 8.53.- Colocación final de los hilos anódicos

El error en el posicionamiento de los hilos tras su colocación deberá ser inferior a 100 μm , siendo determinante la precisión mecánica en el moldeado de las piezas posicionadoras, así como el correcto pegado de los posicionadores fijos.

ETAPA 5.- MEDIDAS DE POSICIONADO DE HILOS

Una vez colocados todos los hilos, se medirán sus posiciones con una cámara CCD (figura 8.54) acoplada al cabezal del coordinatógrafo. Esta realizará un barrido en dos tramos distintos de cada hilo, cerca de sus extremos: en el lado FE, donde se colocarán las tarjetas con la electrónica de lectura (Front End boards); y en el lado opuesto, llamado HV, donde se instalarán las tarjetas con la electrónica que distribuirá la alta tensión (High Voltage boards).



Figura 8.54.- Cámara de video sony XC-75CE para medida de hilos

La cámara registrará las imágenes de los hilos, que serán iluminados, y calculará las posiciones relativas de los mismos con respecto a su posición nominal, con una tolerancia inferior a 50 μm . Posición indicada por un patrón de referencia insertado en la mesa de precisión (figura 8.55).

Esta información, junto con la corrección proporcionada por el inclinómetro [13], situado en el dispositivo (cabezal) donde va instalada la cámara CCD (figura 8.56), se registrará en una base de datos.



Figura 8.55.- Medida de hilos con cámara CCD. Detalle en la parte inferior derecha

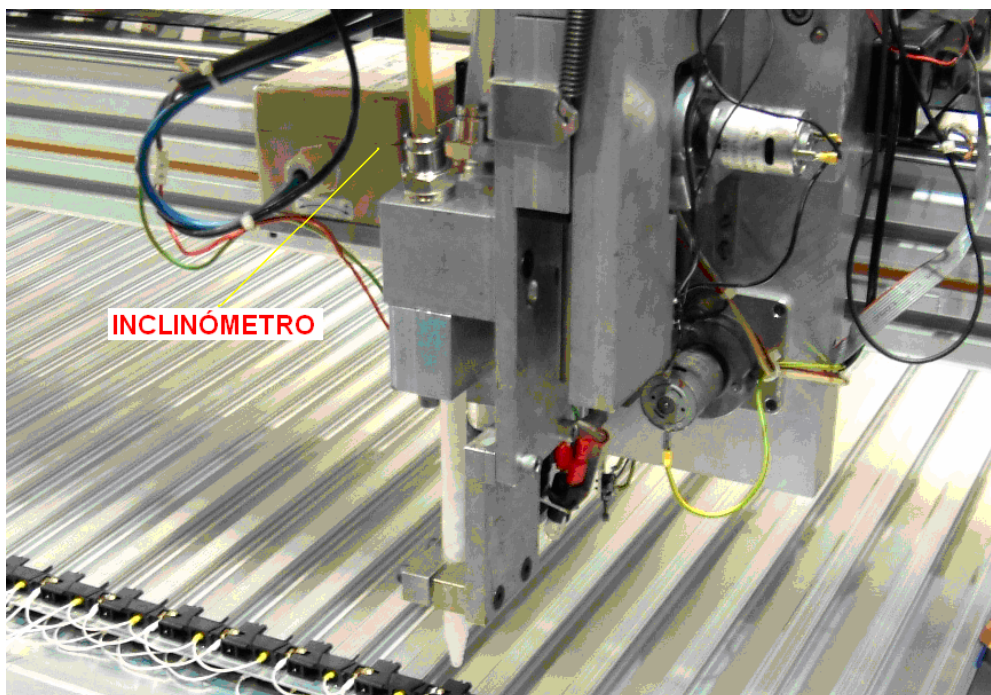


Figura 8.56.- Inclinómetro instalado en el cabezal

Si la cámara no registrara la posición del hilo, el proceso de medida se detendría, debiéndose verificar su estado. Puede ocurrir que no se haya colocado el hilo, en cuyo caso habrá que colocarlo y repetir la medida. También puede suceder que no se pueda enfocar al encontrarse muy cerca del objetivo de la cámara, por una colocación incorrecta de los posicionadores móviles (mal apoyados en la plancha); en este supuesto, habrá que colocarlos adecuadamente y repetir la medida. Por último, puede que alguno de los posicionadores móviles o los dos, estén invertidos, debiéndose corregir su colocación y repetir la medida.

Las figuras 8.57 y 8.58 muestran los residuos de la posición de los hilos con respecto a su posición nominal, en los lados HV y FE, para cada capa de la supercapa P75 de la cámara MB2-38 medidos mediante este dispositivo. En la figura 8.59 se aprecian los residuos medios de las posiciones de los hilos de dicha supercapa [14].

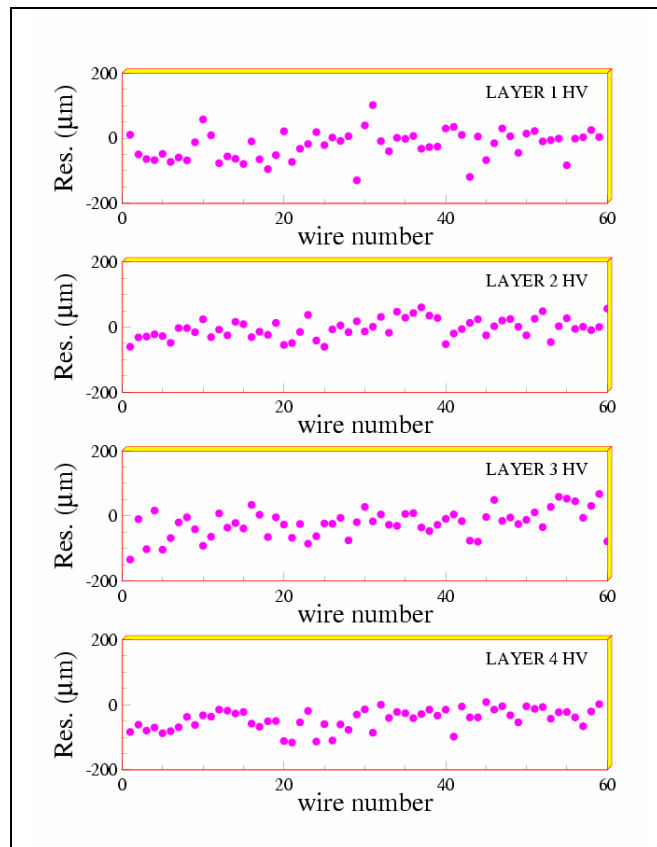


Figura 8.57.- Residuos de las posiciones de los hilos (lado HV) de la supercapa P75

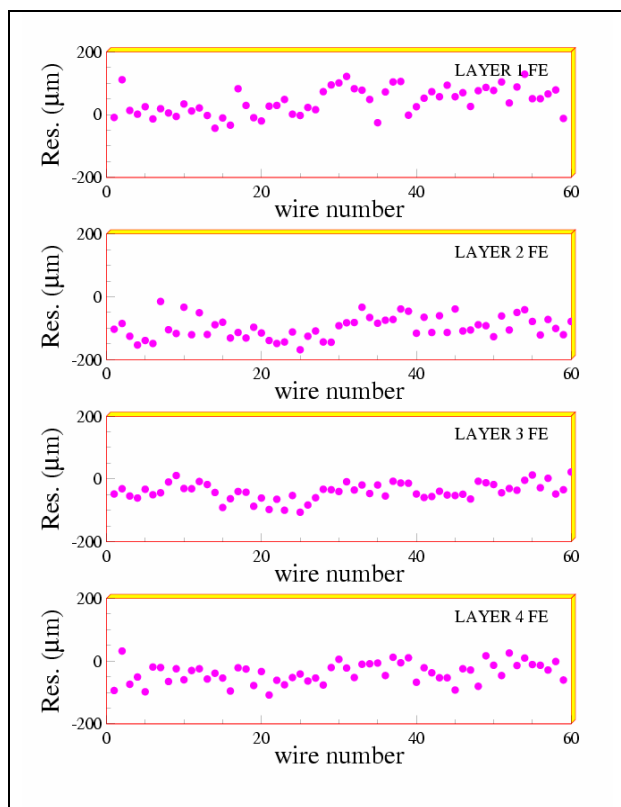


Figura 8.58.- Residuos de las posiciones de los hilos (lado FE) de la supercapa P75

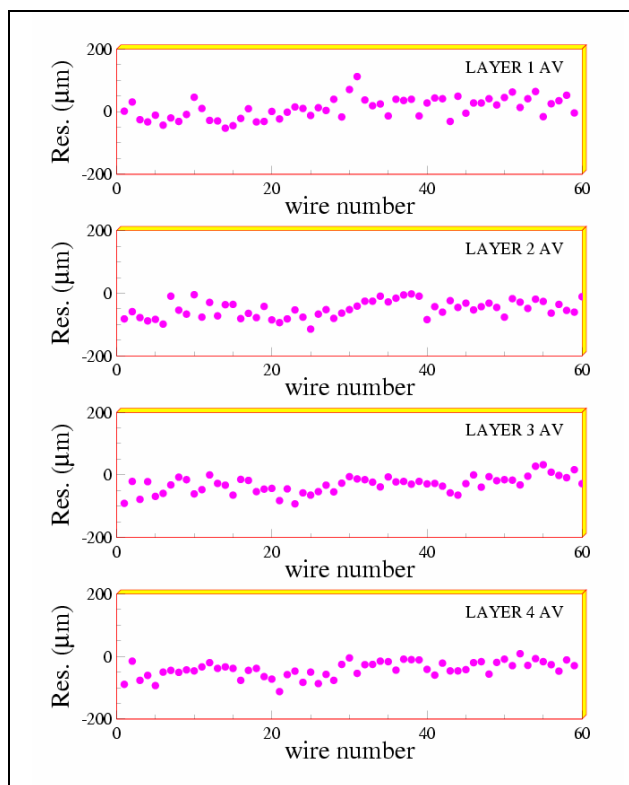


Figura 8.59.- Residuos medios de las posiciones de los hilos de la supercapa P75

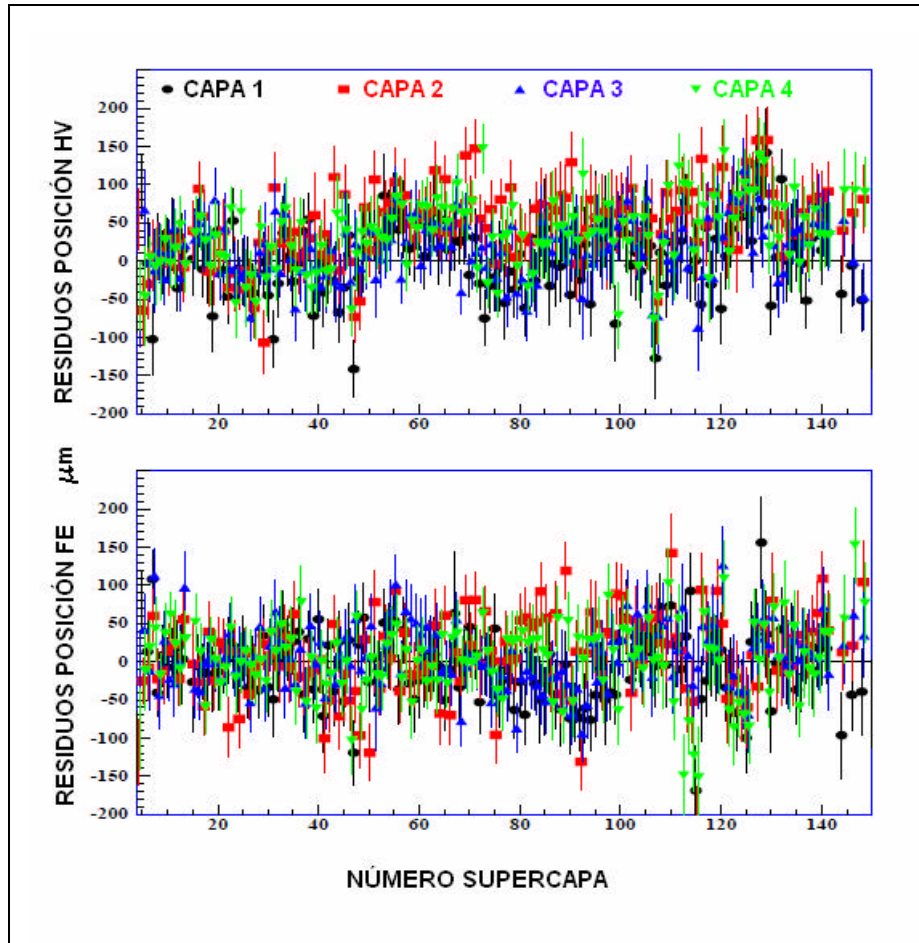


Figura 8.60.- Residuos medios de las posiciones de los hilos de todas las supercapas

ETAPA 6.- MEDIDA DE LA TENSIÓN MECÁNICA DE LOS HILOS

La tensión mecánica de los hilos, que inicialmente se midieron manualmente [15] y de forma individual (figura 8.61), se medirán globalmente de forma automática, registrando sus valores en una base de datos general [14]. Estos valores se obtendrán con un dispositivo capaz de medir la tensión de todos los hilos [16] de una capa a la vez (hasta 64 hilos), desarrollado en la Purdue University (Indiana. USA) (figura 8.62).

Este dispositivo medirá la tensión (F) sin contactar directamente con los hilos, excitándolos a través de un electrodo con discontinuidades, entre las que se encuentran situados los hilos; el cual estará sometido a corriente alterna, que hace oscilar los hilos en función del cambio de la capacidad eléctrica introducida por los mismos (figura 8.63).

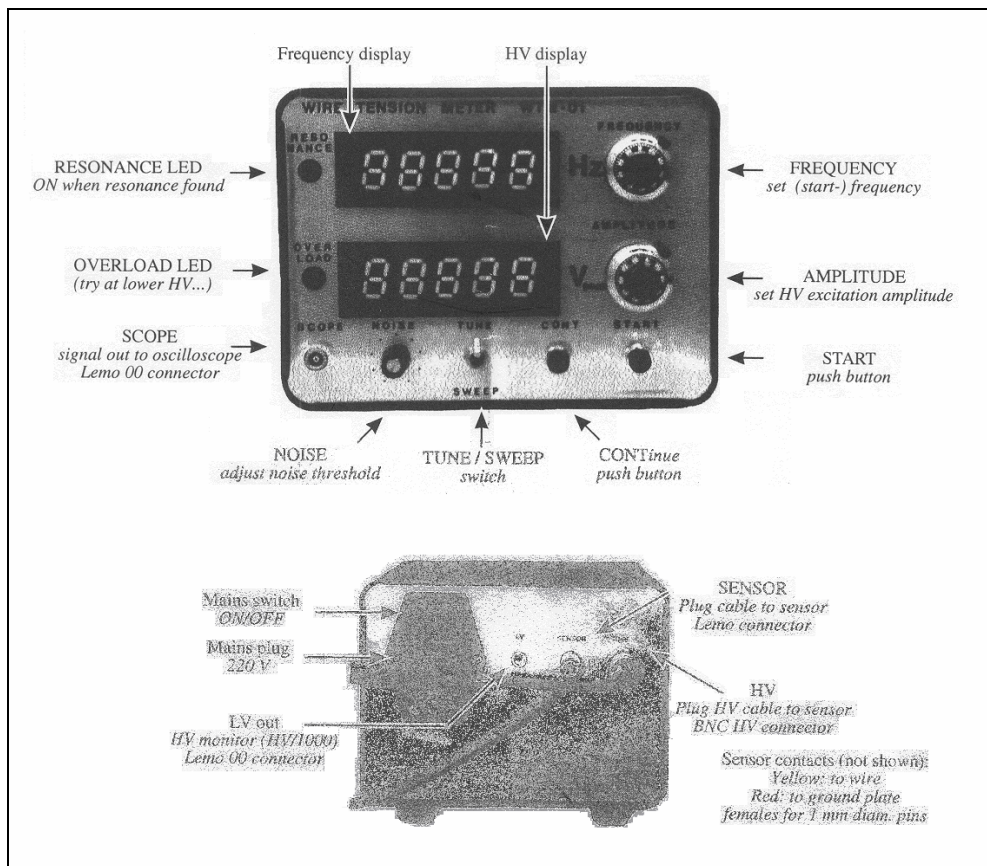


Figura 8.61.- Anverso y reverso del medidor individual de tensión WTM-01



Figura 8.62.- Dispositivo WTM-64 para medida de la tensión mecánica de hilos

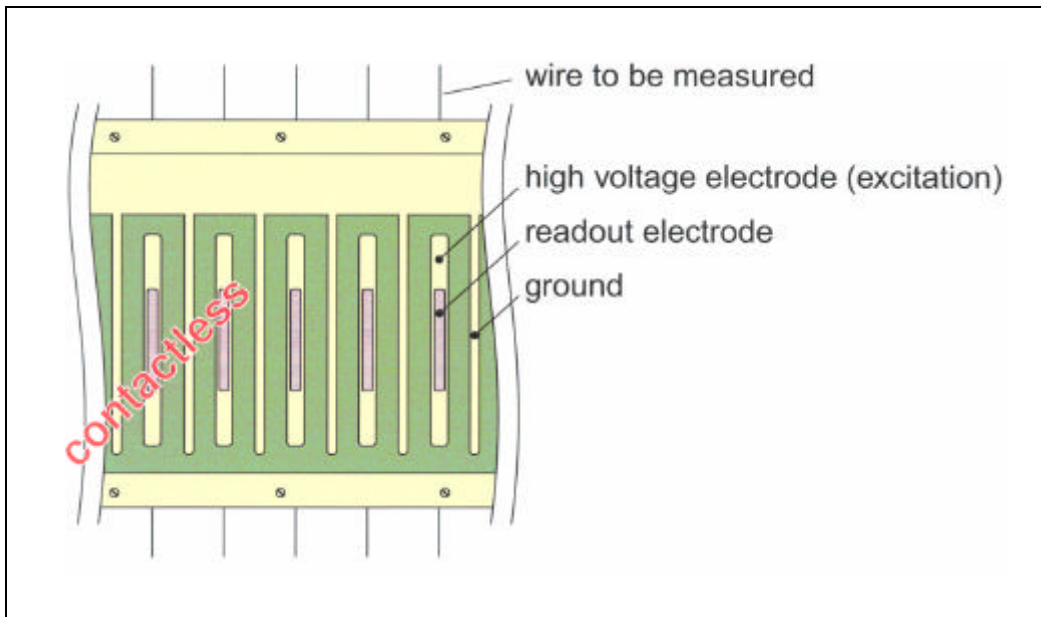


Figura 8.63.- Detalle de la base de apoyo en las vigas del dispositivo WTM-64

A partir de su frecuencia de oscilación, se inducirá una tensión eléctrica en los hilos que producirá en ellos un comportamiento resonante (figura 8.64). Este voltaje es el que se mide para verificar la correcta tensión mecánica de los hilos. La fórmula que relaciona la frecuencia que produce la resonancia en los hilos con su tensión mecánica F es la siguiente:

$$F = \mu \left(\frac{2 \cdot f \cdot l}{n} \right)^2 \quad (8.1) \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Siendo μ la densidad lineal del hilo, l su longitud, f la frecuencia a la que se produce la resonancia y n el modo de oscilación. En la mayoría de los casos de valor 1, en particular si se coloca el dispositivo en la parte central de los hilos. El valor nominal para la tensión del hilo es de 3 N [15], considerándose valores admisibles los comprendidos en el intervalo 2.7 N y 3.3 N.

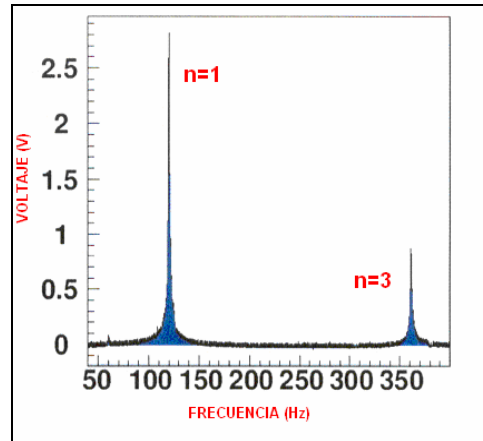


Figura 8.64.- Relación entre la frecuencia y la tensión eléctrica aplicada

En la gráfica de las figuras 8.65 y 8.66 se representan los valores de las tensiones de los hilos, en las cuatro capas de la supercapa P140 y Z59 de la cámara MB2-68 [14]. En la gráfica de la figura 8.67 se indican los valores medios de las tensiones para 18 supercapas P, fabricadas en una de las mesas de precisión. Cada color representa una de las capas de la supercapa.

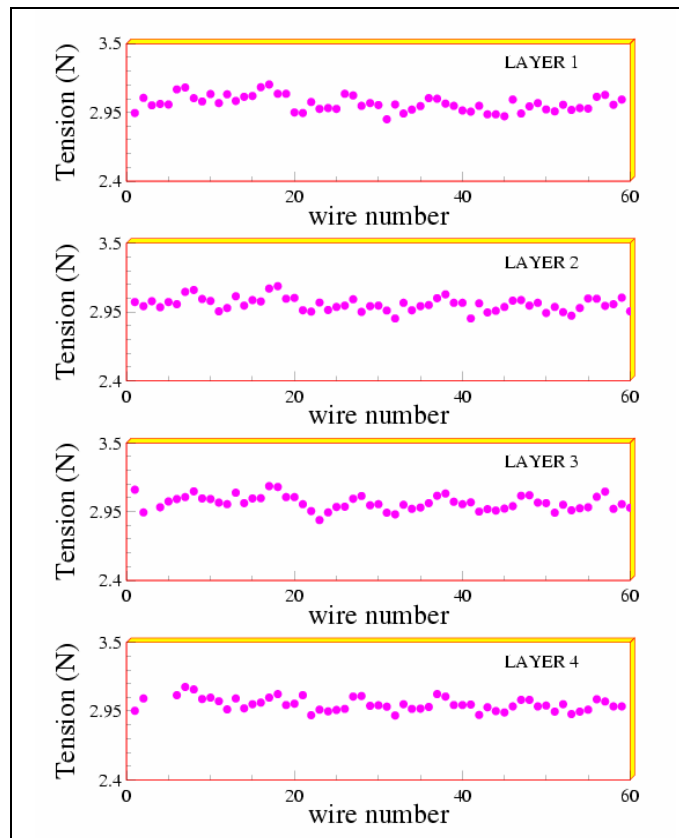


Figura 8.65.- Valores de las tensiones de los hilos de la supercapa P140

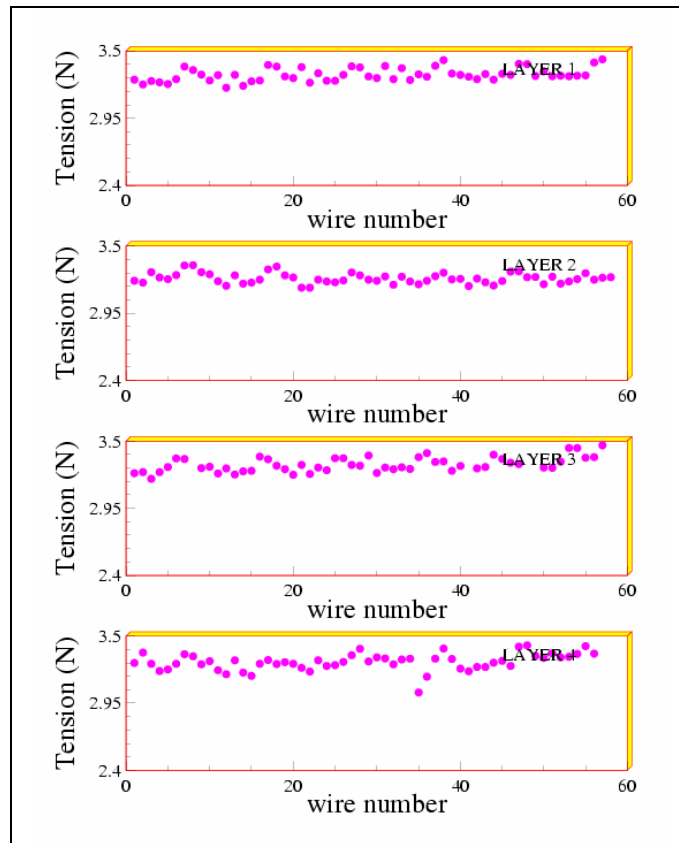


Figura 8.66.- Valores de las tensiones de los hilos de la supercapa Z59

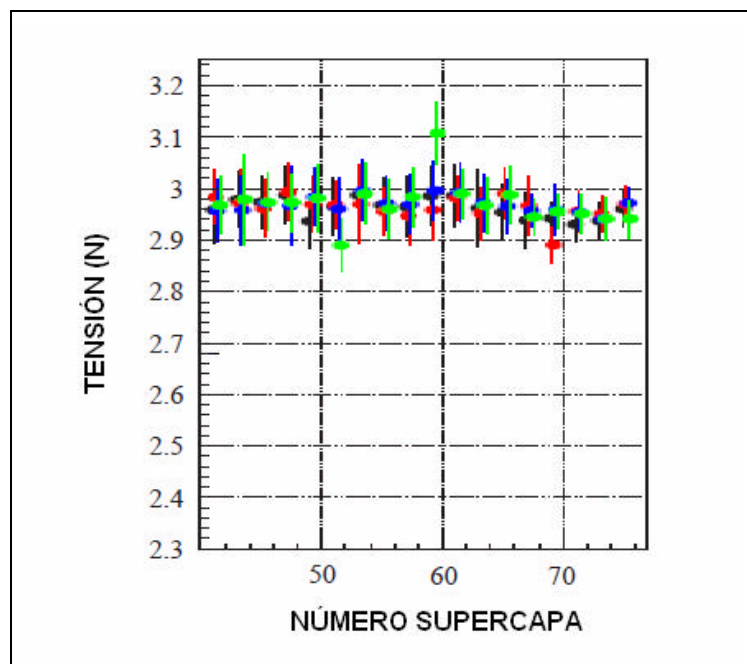


Figura 8.67.- Valores medios de las tensiones de los hilos en varias supercapas

La tensión mecánica de los hilos es crítica y puede quedar fuera de tolerancia. Por ello, una vez comprobada la tensión mecánica en los hilos de la capa se reemplazarán aquellos cuya tensión no se encuentre en el intervalo de valores admitido (si se da el caso).

Después se cableará el lado de alta tensión (HV); se conectarán los cables para la distribución de la misma, que interconectan a los electrodos formadores de campo (color blanco) y a las vigas catódicas (color amarillo), en grupos de cuatro (figura 8.68).

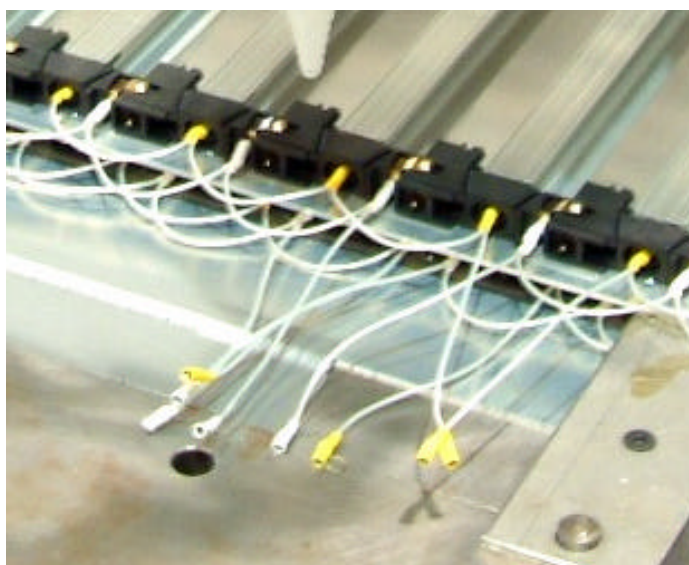


Figura 8.68.- Cableado de alta tensión

ETAPA 7.- DISPENSADO DE ADHESIVO Y PEGADO PLANCHA INTERMEDIA

Para terminar la capa, se dispensará adhesivo sobre la cara superior de las vigas catódicas (figura 8.69), y se colocará, a continuación, sobre ellas, una plancha intermedia (con cátodos conformadores del campo eléctrico por ambos lados) con el dispositivo transportador (figura 8.70), situándola correctamente con las piezas de referencia adecuadas.

A continuación se dispondrá sobre ella el sistema de pesos distribuidos y se dejará curar el adhesivo (12 h). Una vez transcurrido el tiempo de curado, finalizará la fabricación de la capa.



Figura 8.69.- Dispensado de pegamento sobre las vigas

La experiencia en la fabricación de las primeras supercapas demostró que era posible una doble operación de dispensado de adhesivo y curado simultáneo. Así, se dispensaba adhesivo sobre las vigas de la primera capa, se colocaba una plancha intermedia, se dispensaba adhesivo sobre ella y se colocaban los cátodos correspondientes a la segunda capa; y así sucesivamente con las siguientes capas, hasta colocar los cátodos de la cuarta capa, siendo la última operación la colocación de la plancha superior.

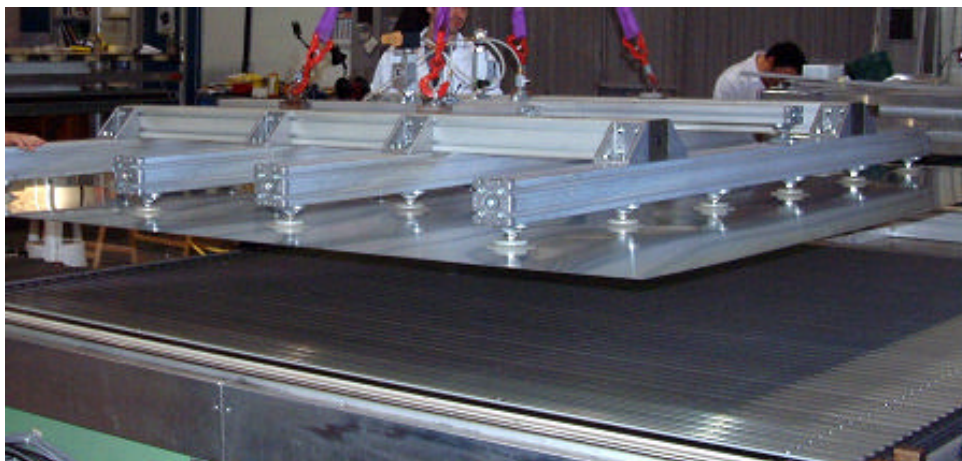


Figura 8.70.- Transporte y colocación de plancha intermedia

Con esta modificación se conseguirá disminuir el tiempo de fabricación de una supercapa, siempre que se realice la doble operación en un tiempo inferior a 45 minutos, ya que una vez dispensado el adhesivo empieza a endurecer transcurrido 60 minutos, haciendo imposible la utilización de esta técnica [17].

Por tanto, el tiempo óptimo de realización de esta doble operación de pegado será de 30 minutos. Los tiempos de curado, necesarios para la fabricación de una supercapa, se reducirán de 96 horas y 8 operaciones a 60 h y 5 operaciones.

8.4.2.2.- FABRICACIÓN DE SUPERCAPAS

El proceso de fabricación de capas se repetirá de forma iterativa, con procedimientos idénticos a los descritos anteriormente, hasta completar tres capas en orden ascendente, siendo la plancha intermedia superior de la primera capa, la inferior de la segunda y así sucesivamente.

La fabricación de la cuarta capa, que completará una supercapa, diferirá del procedimiento anteriormente citado, pues se incluirán en el mismo las operaciones necesarias para sellar la supercapa, ensamblando las piezas correspondientes al confinamiento del gas [16].

Así, antes del pegado de la plancha superior de la cuarta capa, se insertarán y pegarán con Araldit 2013 [10] en los laterales de la supercapa, dos vigas con perfil "C" cuya finalidad será el sellado posterior del conjunto.

En los extremos de los perfiles, en cada una de las cuatro esquinas de la supercapa, se colocará un bloque de aluminio (figura 8.71 y 8.72) con taladros de referencia mecanizados con precisión. Las tolerancias se indican en el plano de la figura 8.73.

La colocación de estos bloques (corner blocks) tiene una importancia fundamental, ya que las posiciones de los hilos serán referenciadas con respecto a la posición del bloque situado a la derecha en el lado HV. La precisión en la colocación de este bloque será de 100 μm .

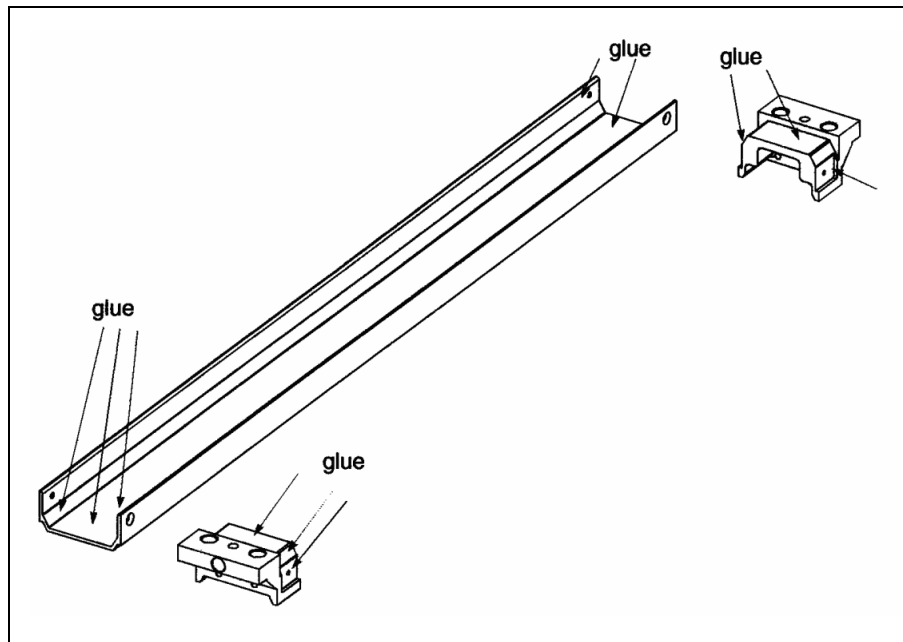


Figura 8.71.- Viga “C” y bloques de aluminio

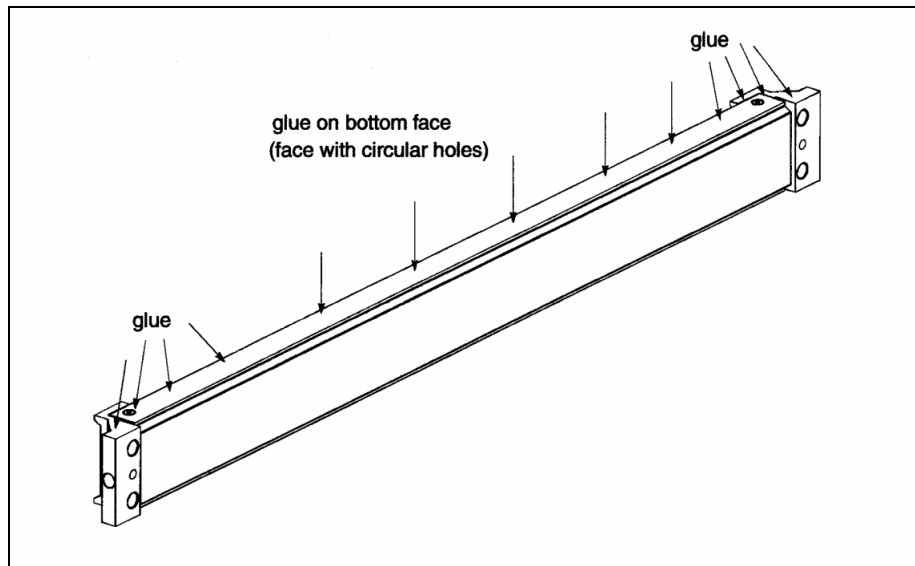


Figura 8.72.- Ensamblaje de los bloques de aluminio (izquierda) en la viga “C”

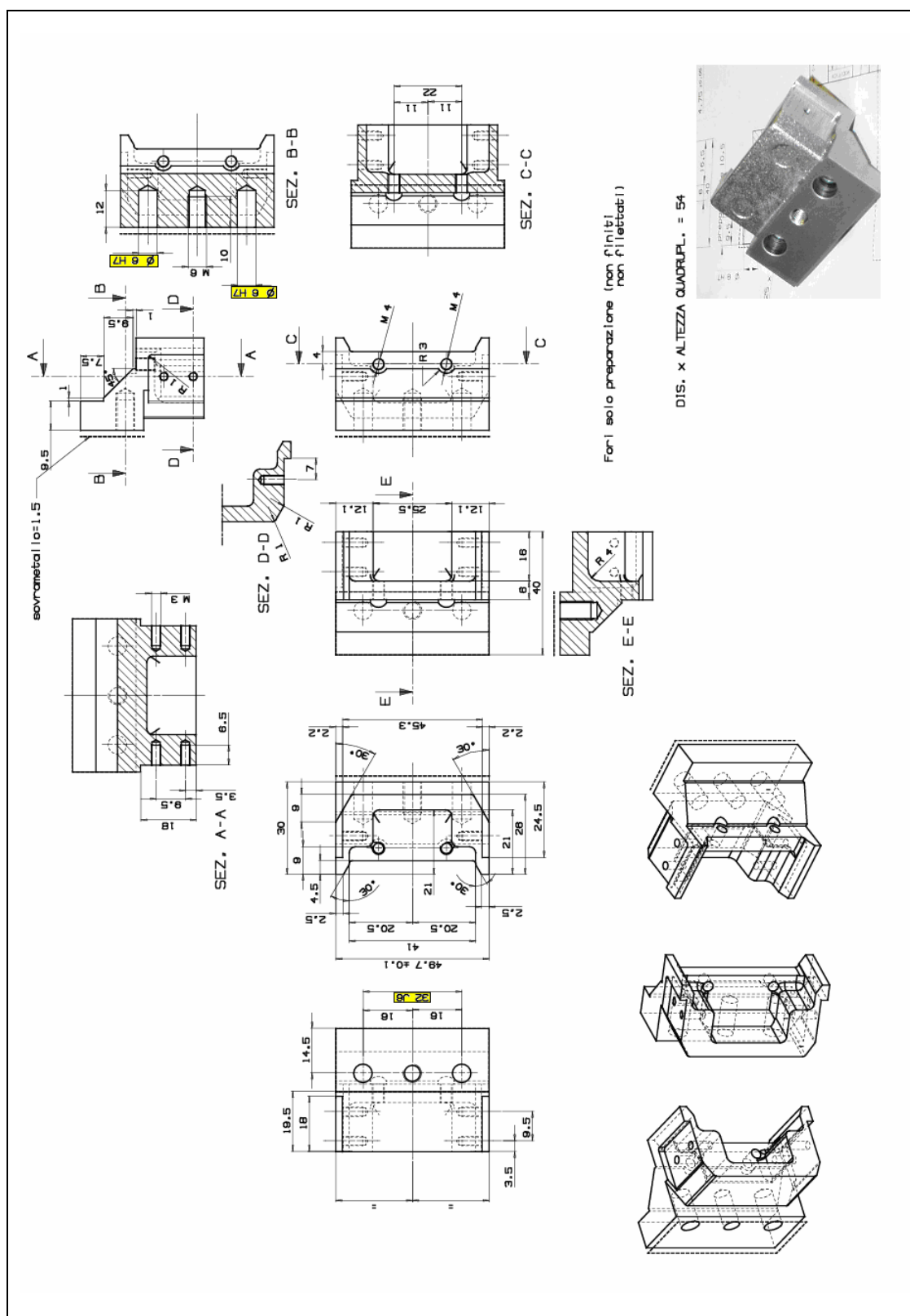


Figura 8.73.- Plano de fabricación del corner block

Una vez colocados las vigas y los bloques, la supercapa estará preparada para pegar la plancha superior (figura 8.74). Para ello se dispensará pegamento y se colocará la plancha sobre las vigas catódicas y los perfiles laterales (figura 8.75), colocándose a continuación los pesos distribuidos sobre la supercapa y dejando curar el adhesivo (12 h).

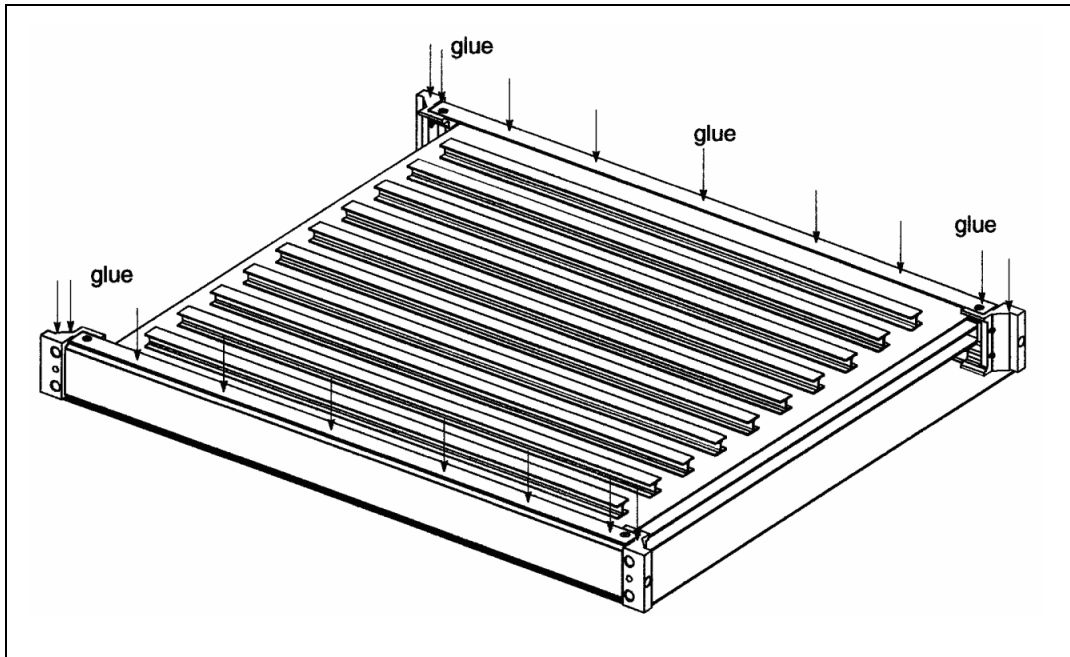


Figura 8.74.- Supercapa preparada para el pegado de la plancha superior



Figura 8.75.- Colocación de la plancha superior de una supercapa

Para comprobar la orientación relativa entre las distintas supercapas que forman una cámara, se medirán las posiciones relativas entre los corner blocks de las mismas con un sistema fotogramétrico. Esta tarea se realizará en el CERN (figura 8.76). La última operación que completará una supercapa, se ejecutará en la mesa de pruebas de estanqueidad [18].

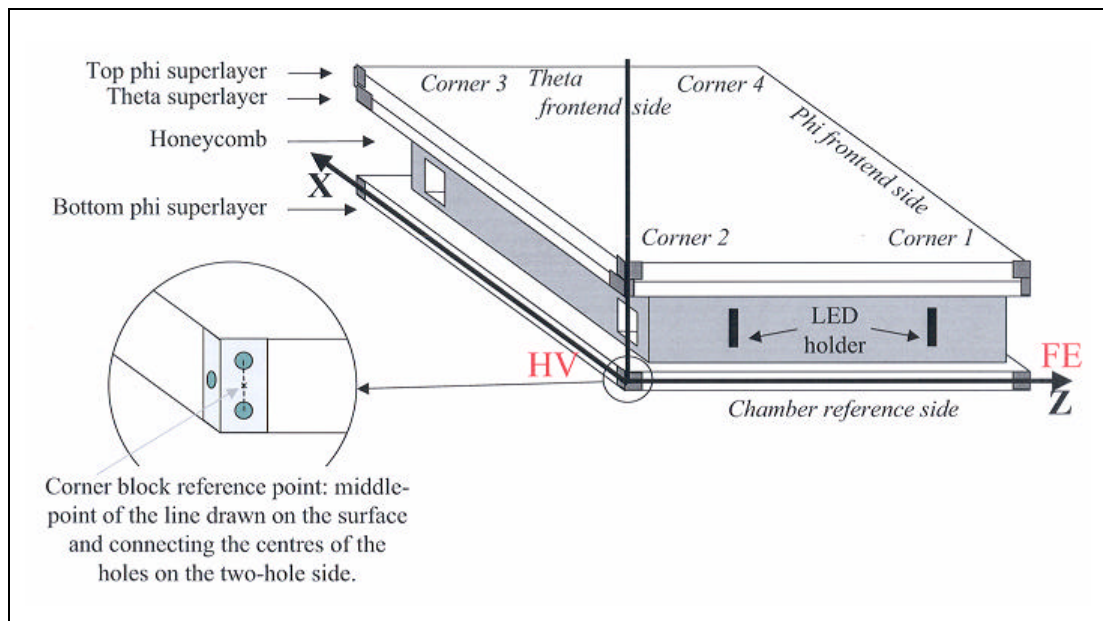


Figura 8.76.- Sistema de referencia de cámaras en relación a los corner blocks (CERN)

Una vez transportada la supercapa con el útil correspondiente de la mesa de precisión a la mesa de pruebas de estanqueidad, se ensamblarán y pegarán dos marcos en los lados FE y HV, formados por dos perfiles L y dos piezas verticales de aluminio (figuras 8.77). Los perfiles, uno frontal y otro posterior, cerrarán herméticamente la supercapa mediante el atornillado de sendas tapas equipadas con una junta de estanqueidad.

En estos perfiles se instalarán dos racores para entrada y salida de gas y un conector a masa de las cinco planchas de aluminio (figura 8.78).

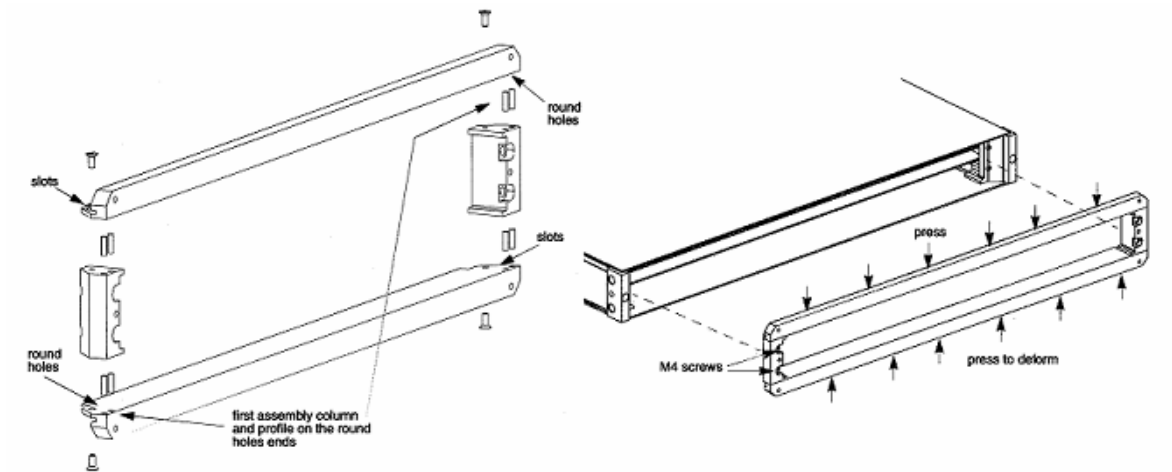


Figura 8.77- Perspectiva del montaje (izquierda) y colocación de marco FE (derecha)



Figura 8.78- Tapa atornillada en una supercapa de una cámara de deriva

Las piezas verticales de precisión, que interaccionan con sendos corner blocks, estarán mecanizadas con las tolerancias indicadas en el plano de la figura 8.79.

Por último, para que las conexiones a tierra sean uniformes, se soldarán varias bandas de cobre de 0.1 mm de espesor a los marcos y perfiles laterales, que mejorarán el contacto eléctrico entre las planchas de aluminio y estos componentes (figura 8.80).

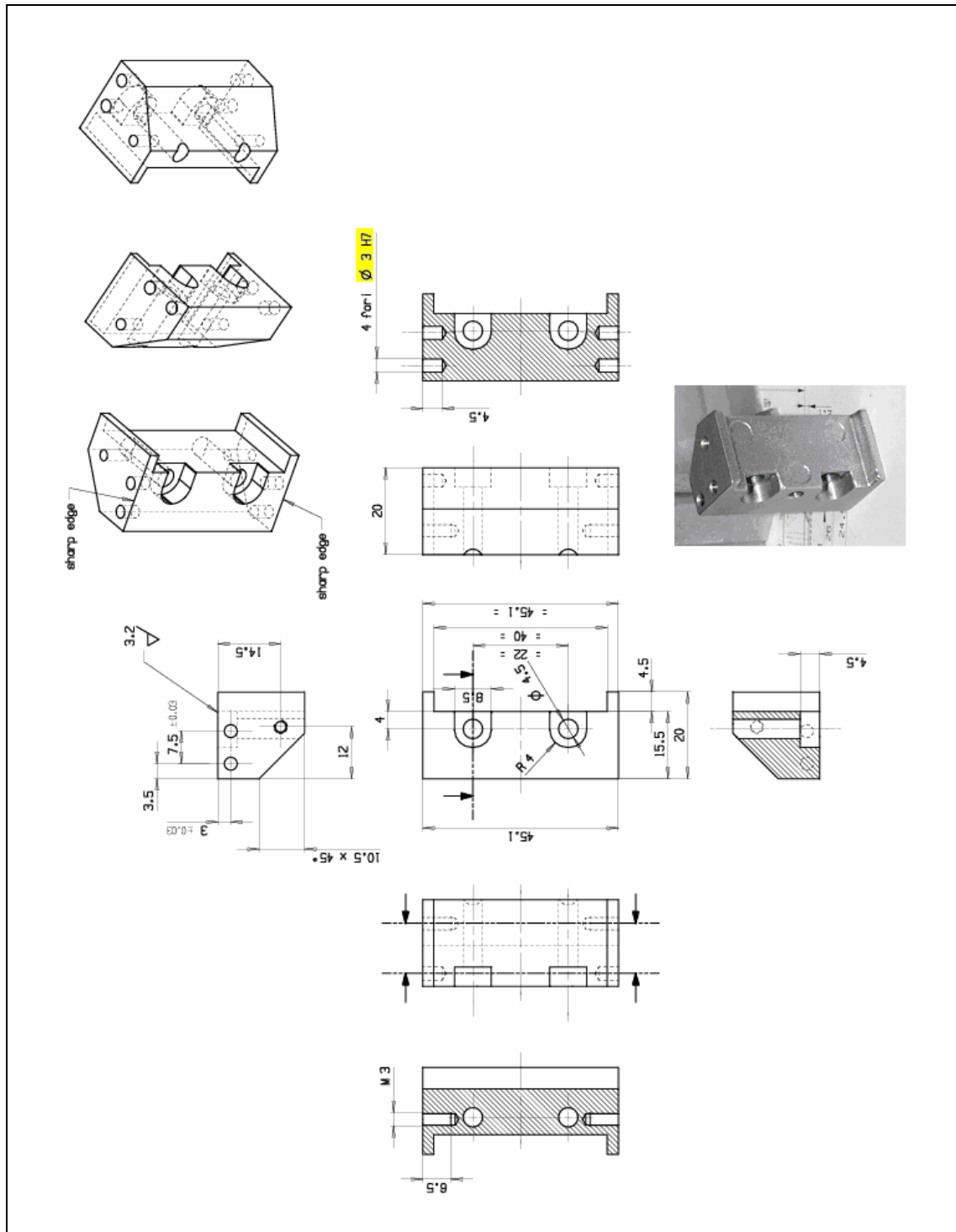


Figura 8.79- Plano de fabricación de las piezas verticales de aluminio (column)

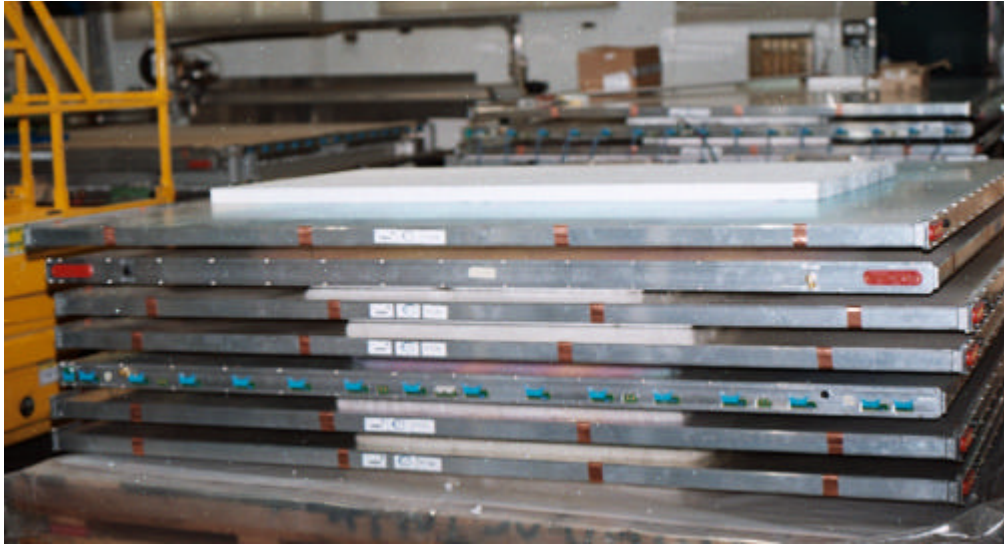


Figura 8.80.- Bandas de cobre soldadas en cámaras de deriva

En paralelo a la fabricación de supercapas, se realizará, en una instalación anexa, la instrumentación de las tapas definitivas de los lados HV y FE. Se instalarán todos los conectores necesarios (de señal, de entrada de HV, de alimentación de LV, etc.), los racores de entrada y salida de gas, el distribuidor de flujo de gas y la junta de estanqueidad. Dicha junta se introducirá en el alojamiento que tiene la tapa en su interior y garantizará la estanqueidad de la supercapa, una vez atornilladas las tapas.

Finalizado este proceso, las supercapas se equiparán con los componentes electrónicos restantes [17]: tarjetas distribuidoras de alta tensión (HVBs), tarjetas con la electrónica de acoplo (HVCs), tarjetas de lectura de datos (FEBs) y todo el cableado necesario (figuras 8.81 y 8.82), atornillándose a continuación las tapas definitivas FE y HV.

A partir de ese momento las supercapas quedarán totalmente terminadas y listas para ser sometidas a las pruebas de control de calidad. Una vez superado este control de calidad, podrán pasar a la zona de ensamblaje para formar parte de una cámara de deriva (figura 8.83).

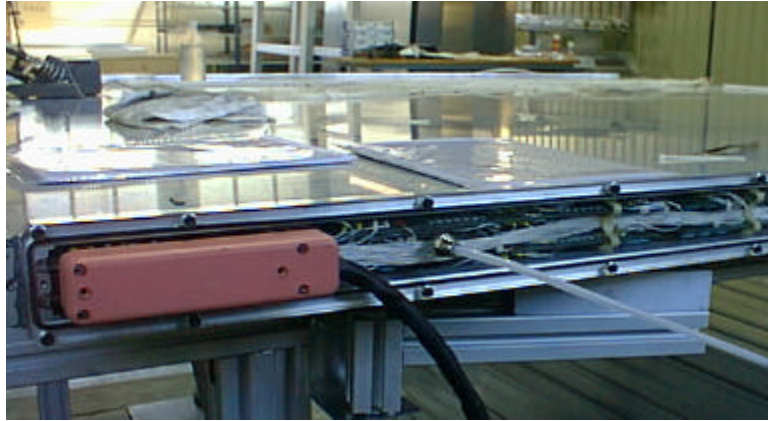


Figura 8.81.- Instrumentación electrónica del lado HV

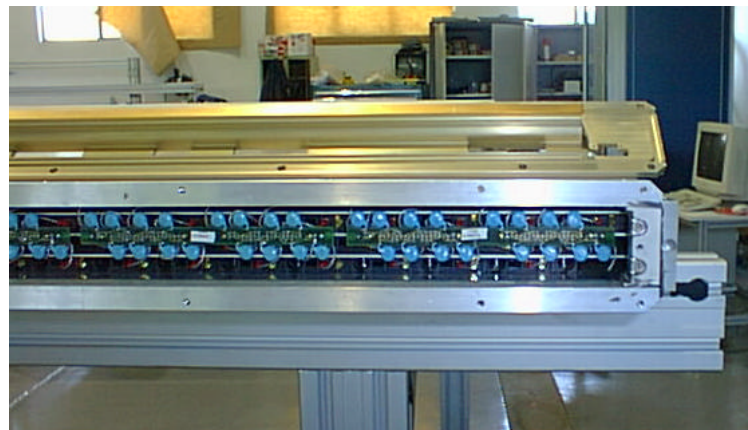


Figura 8.82.- Instrumentación electrónica del lado FE



Figura 8.83.- Almacenamiento de supercapas

8.4.2.3.- FABRICACIÓN DE CÁMARAS

Una vez que las supercapas han superado el control de calidad podrán formar parte de una cámara de deriva. La fabricación de las cámaras de deriva se realizará en la mesa de ensamblado (figura 8.84). En el espesor final de una supercapa de valor nominal 53.5 mm se permitirá un error de 0.2 mm y en el espesor de una cámara de valor nominal 290 mm se permitirá un error de 1 mm, objetivo mejorado en los prototipos MB96 y Q4 [2, 19].



Figura 8.84- Mesa de ensamblado de cámaras de deriva

Para fabricar una cámara tipo MB2 se comenzará transportando una supercapa P (P1) a la mesa de ensamblado (figura 8.85) donde se colocará y fijará a las referencias de la misma (figura 8.86).

Una vez colocada la supercapa P1, se comprobará su espesor con un transductor inductivo de desplazamientos [27] acoplado al cabezal (figura 8.86), que tomará medidas de alturas en varios puntos de su superficie.



Figura 8.85.- Transporte de una supercapa P a la mesa de ensamblado de cámaras

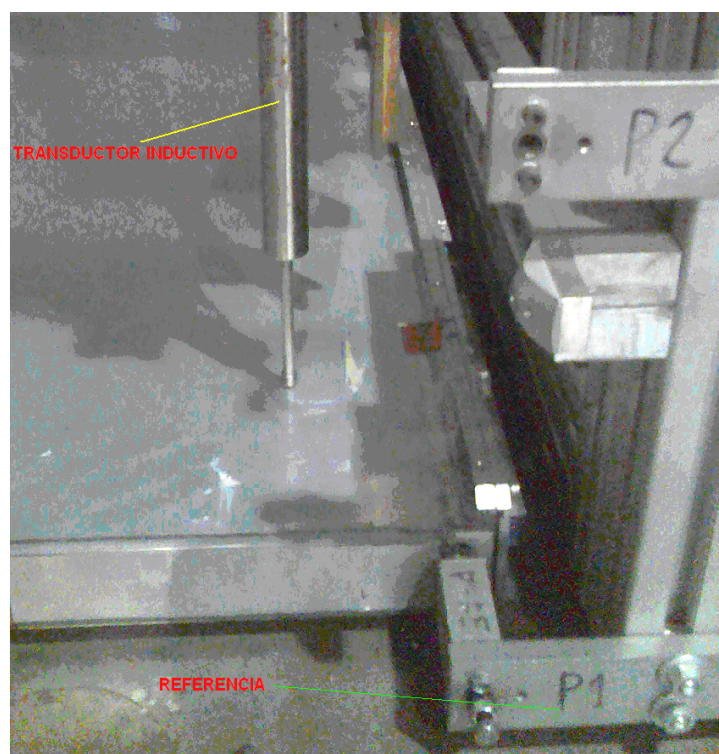


Figura 8.86- Colocación de la supercapa P1 en su referencia.

A continuación, se dispensará adhesivo (Araldit 2012) sobre la plancha superior de la supercapa, se transportará y posicionará seguidamente, sobre ella, el panel rigidizador HC1 correspondiente a este tipo de cámara (figuras 8.87, 8.88 y 8.89).



Figura 8.87- Dispensado de adhesivo sobre P1



Figura 8.88.- Transporte de un panel rigidizador tipo HC1



Figura 8.89.- Colocación del panel rigidizador sobre la supercapa P1

El paso siguiente consistirá en colocar, distribuidos sobre el panel rigidizador, cuatro conjuntos de pesos apilados de 400 Kg cada uno, para asegurar el ensamblado como se observa en la figura 8.90, y se dejará curar el adhesivo.

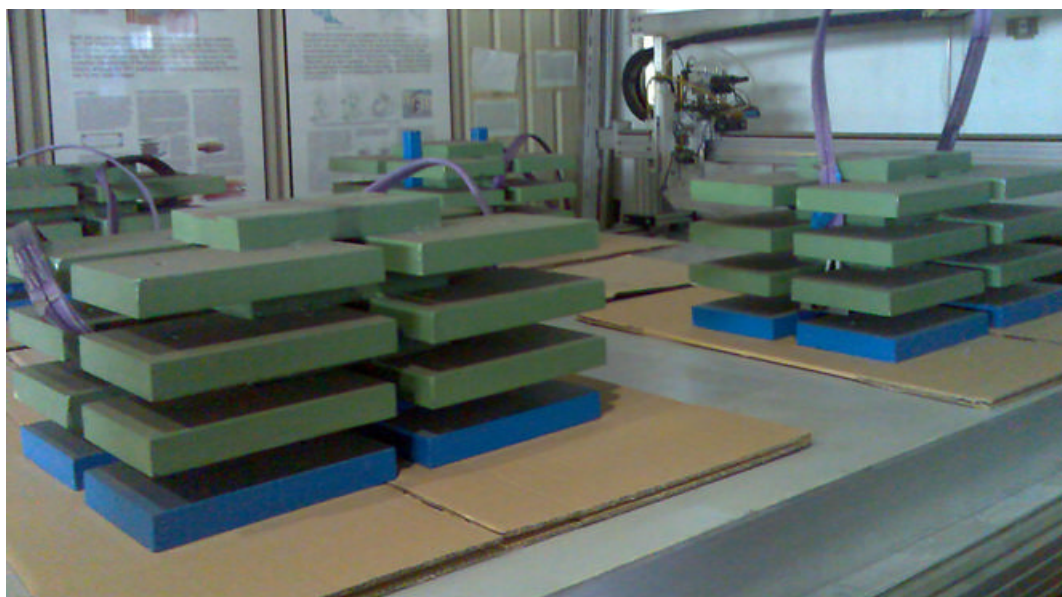


Figura 8.90- Distribución de pesos sobre el panel rigidizador

Una vez transcurrido el tiempo de curado (12 h), quitados los pesos y depositados en su almacenamiento, se comprobará, con el transductor, el espesor del conjunto supercapa – panel rigidizador (figura 8.91); y se dispensará adhesivo sobre el mismo. La siguiente operación consistirá en colocar y fijar una supercapa Z (figura 8.92) sobre el subconjunto supercapa P1- panel HC1, colocación de los pesos descritos anteriormente y curación del adhesivo.

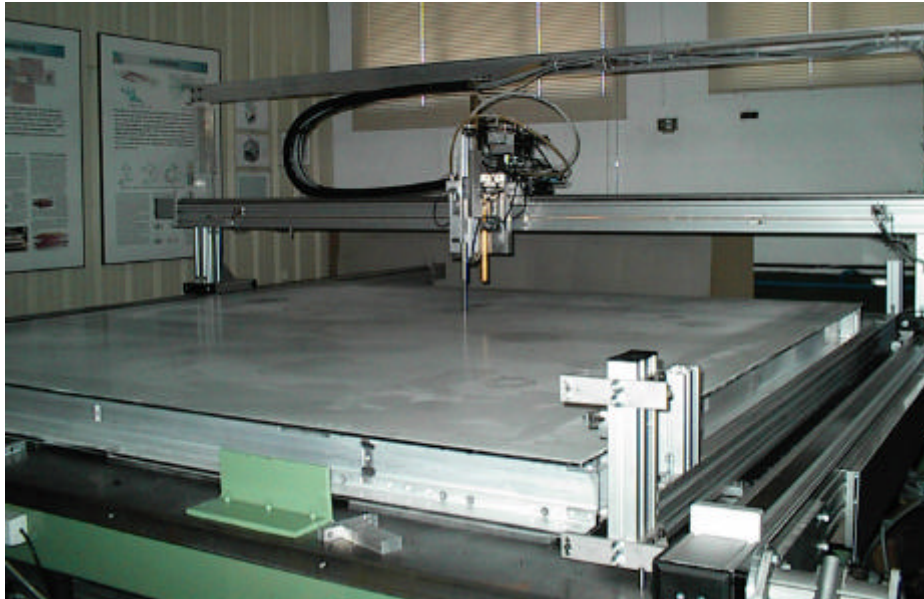


Figura 8.91.- Medición del espesor de un subconjunto P1-HC1



Figura 8.92.- Pegado de la supercapa Z de una cámara MB2

Una vez curado el adhesivo (12 h) y retirados los pesos, se comprobará el espesor del subconjunto P1-HC1-Z; se dispensará adhesivo sobre la plancha superior de la supercapa Z; se colocará y fijará sobre ella una supercapa P (P2); se distribuirán los grupos de pesos sobre su plancha superior, y se dejará curar el adhesivo.

Posteriormente se comprobará el espesor total y la planitud de la cámara MB2 en, al menos, 20 puntos de su superficie, y se introducirán sus valores en la base de datos (figuras 8.93 y 8.94). Con esta operación quedará finalizada la construcción de una cámara MB2 (figura 8.95).

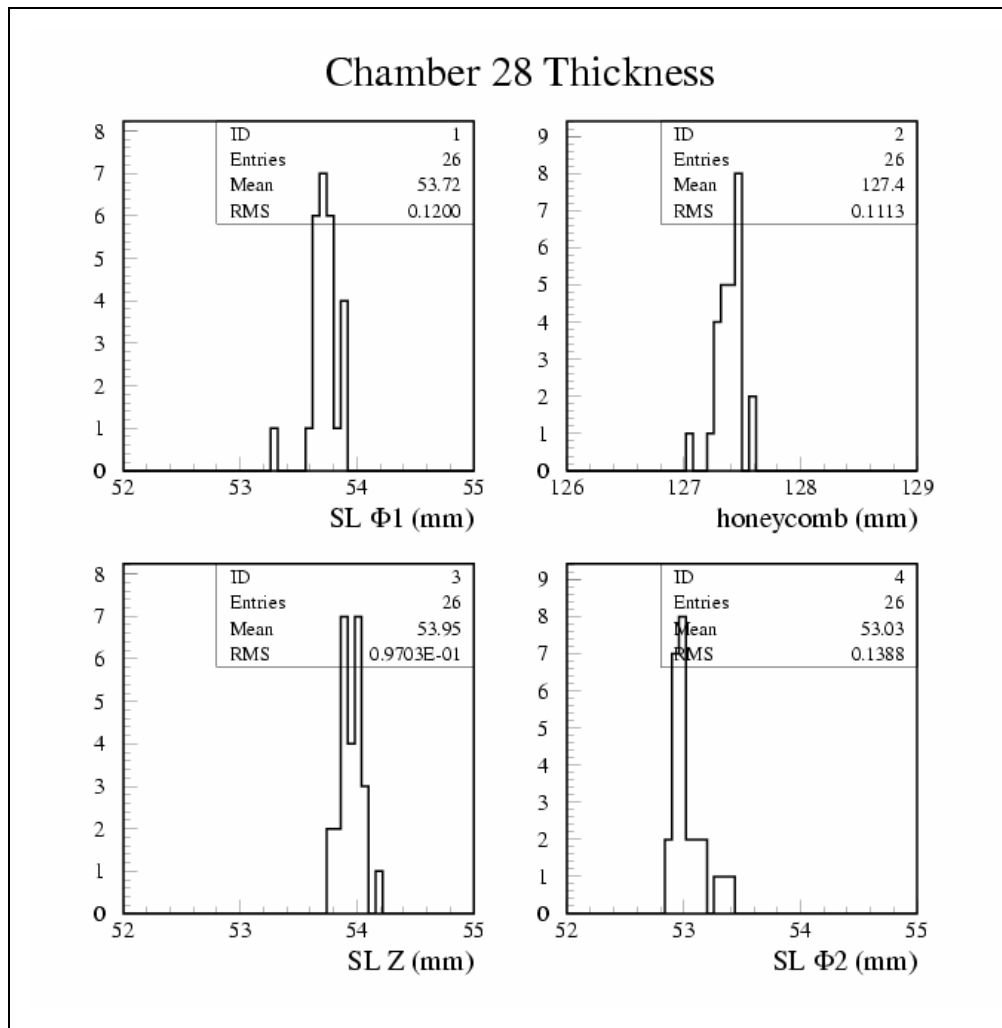


Figura 8.93.- Medida de espesores por módulos en la cámara 28 TIPO MB2 [3]

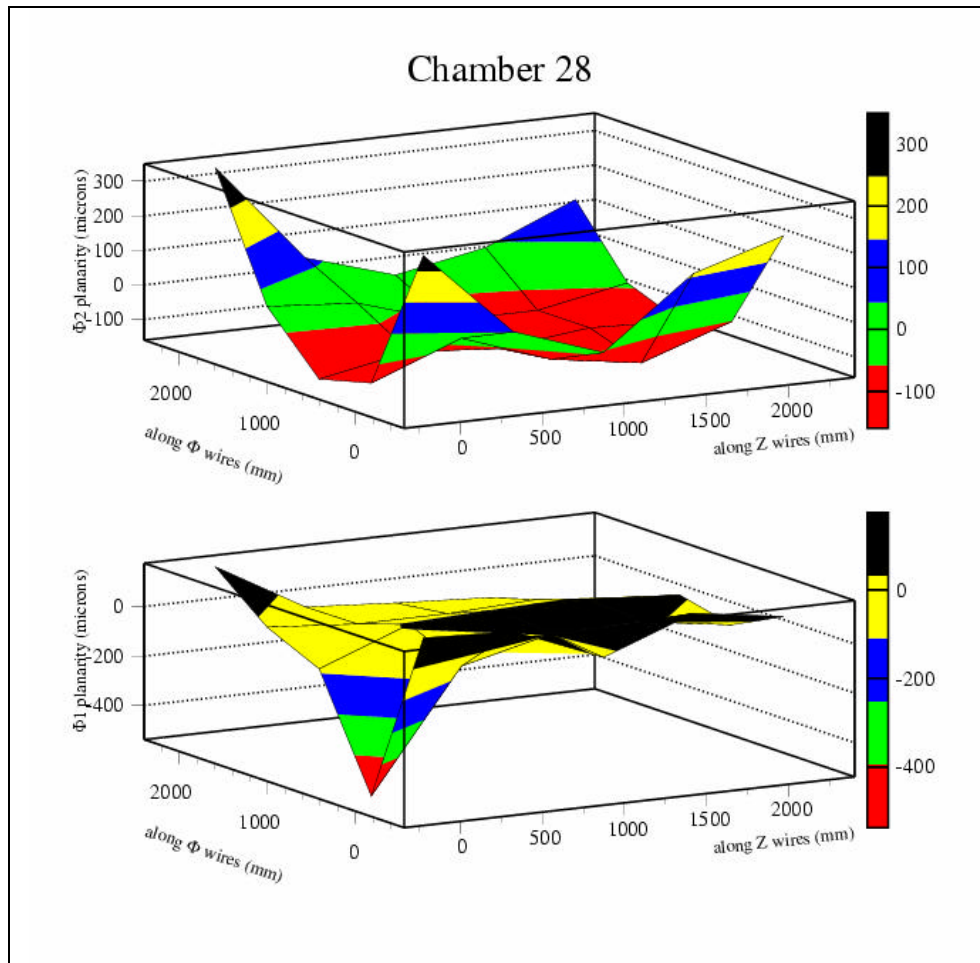


Figura 8.94.- Planitud de las dos supercapas P de la cámara 28 TIPO MB2 [3]

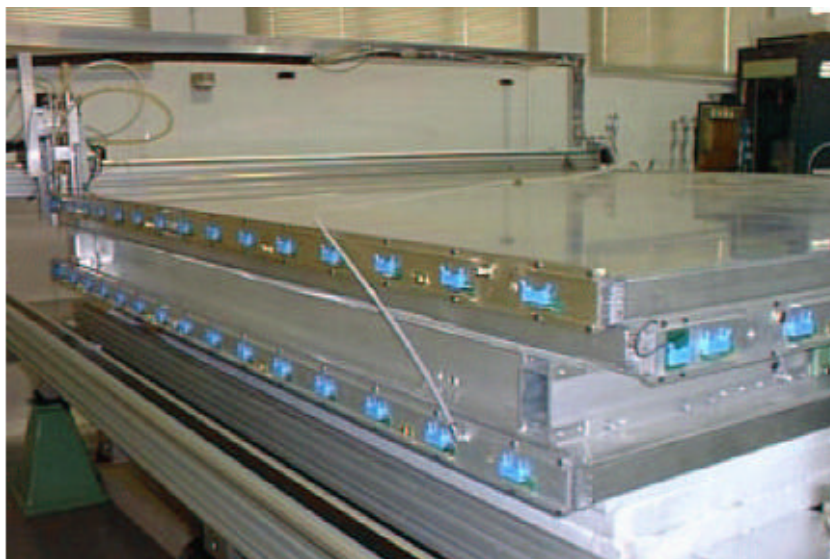


Figura 8.95.- Primera cámara (MB2) fabricada en el CIEMAT

Para fabricar una cámara tipo MB4, el proceso será casi idéntico al empleado para la fabricación de cámaras MB2. Se modificará colocando después de la primera supercapa P1 ,y tras dispensar el adhesivo sobre ella, el panel rigidizador HC2 correspondiente a este tipo de cámaras; a continuación, transcurrido el tiempo de curado, se dispensará adhesivo y se colocará la segunda supercapa P2 sobre él.

En este caso, se comprobarán los espesores de los subconjuntos P1, P1-HC2 y el de la cámara MB4 completa (figura 8.96), así como su planitud (figura 8.97). Se registrarán los valores obtenidos en, al menos, 20 puntos de su superficie. Y, con esta operación, quedará finalizada la construcción de una cámara tipo MB4 (figura 8.98).

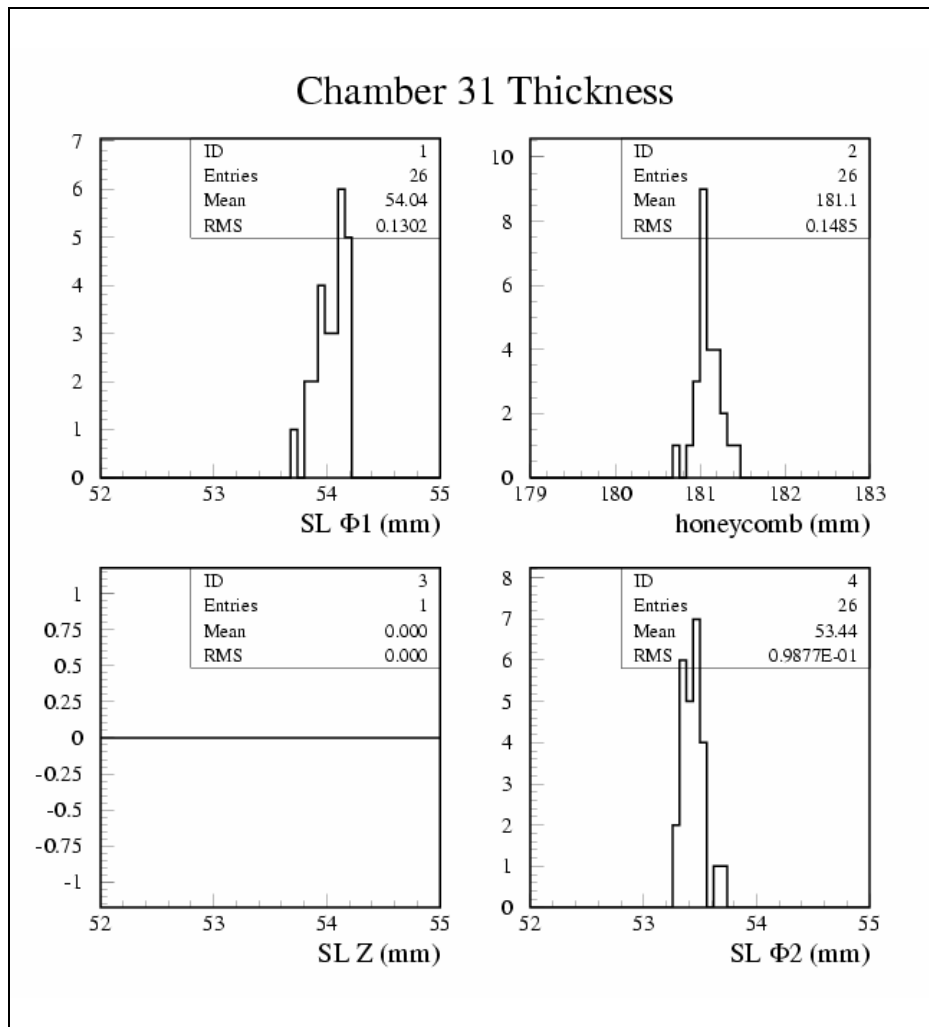


Figura 8.96.- Medida de espesores por módulos en la cámara 31 TIPO MB4 [3]

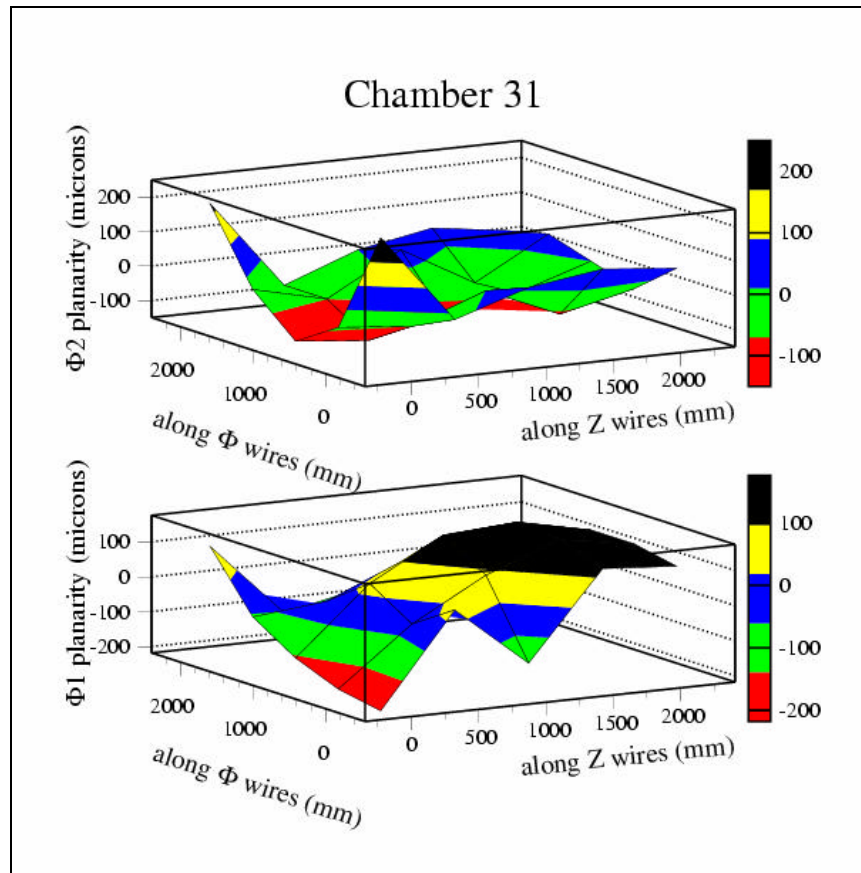


Figura 8.97.- Planitud de las dos supercapas P de la cámara 31 TIPO MB4 [3]



Figura 8.98.- Última cámara (MB4) fabricada en el CIEMAT (2.009)

Antes de almacenar cualquier cámara en la estructura soporte, en la que se transportará por carretera al CERN, las seis piezas de conexión con las cámaras RPC y los tres suplementos intermedios, se colocarán adecuadamente con un útil posicionador, y se pegarán a las cámaras (figura 8.99).



Figura 8.99.- Cámara colocada en la estructura soporte para su transporte

8.5.- CONTROL DE CALIDAD

8.5.1.- INTRODUCCION

El control global de calidad de las cámaras de deriva se dividirá en tres fases diferentes:

- Control de calidad anterior a la producción
- Control de calidad durante la producción
- Control de calidad en el CERN antes de su instalación en el detector

Las dos primeras fases se realizarán en los centros de fabricación, adquiriéndose en la primera etapa la experiencia necesaria para la aplicación sistemática de las pruebas, que se realizarán durante el proceso de producción.

Los procedimientos de control de calidad serán homogéneos en todos los centros de fabricación, pudiendo diferir de unos a otros, siempre que se garantice la calidad de las cámaras.

Existirá una única base de datos (figura 8.100), donde se almacenarán los resultados de las pruebas de control de calidad realizadas [20].

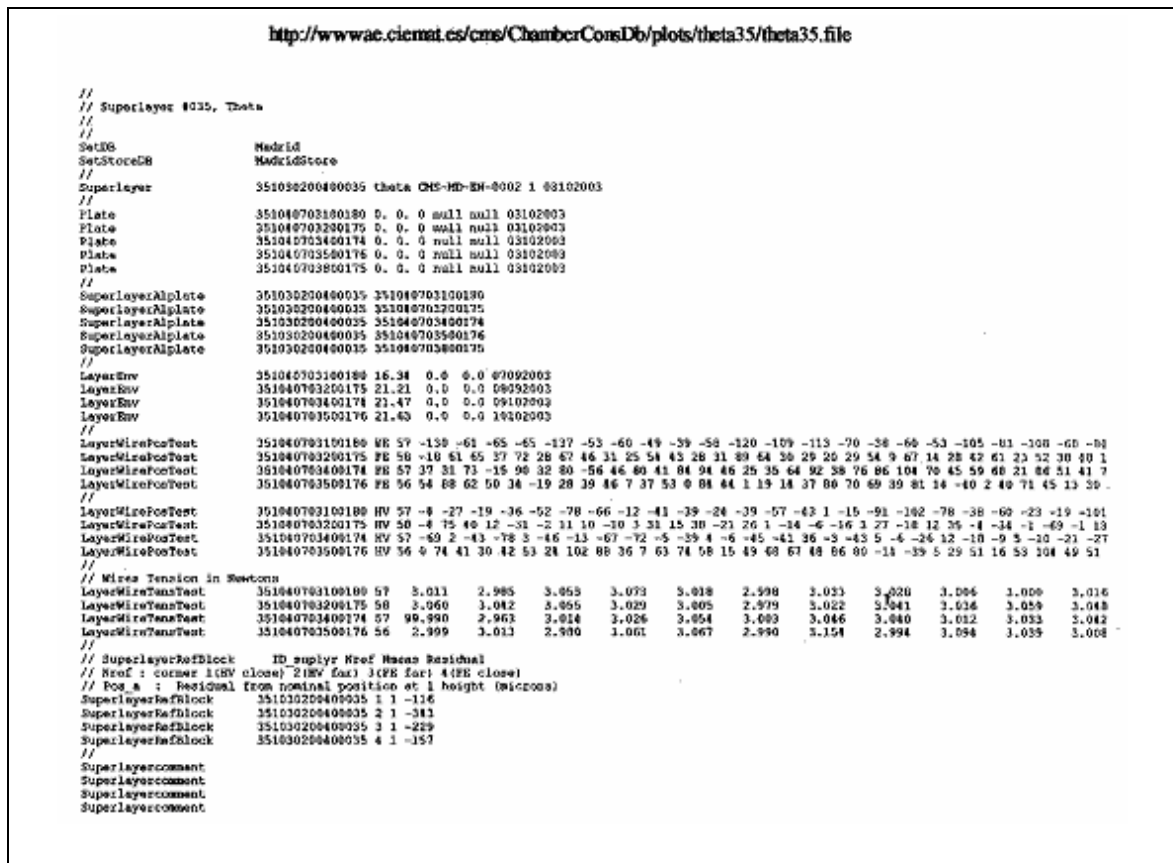


Figura 8.100.- Datos correspondientes a la supercapa Z35 de la cámara MB2-39

A continuación se describirán los controles de calidad realizados, en el CIEMAT, a las supercapas, durante la fabricación y una vez fabricadas, y a la cámara ya ensamblada.

8.5.2.- CONTROL EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN DE SUPERCAPAS

Algunas de las pruebas de control de calidad se han descrito como parte del proceso de fabricación de supercapas. En este punto se describe el procedimiento a seguir en la ejecución de las mismas.

A cada supercapa se le identificará a lo largo de todo el proceso de fabricación mediante un código de barras que se registrará en la base de datos (figura 8.101).



Figura 8.101.- Código de barras de la supercapa P127

8.5.2.1.- POSICIÓN DE HILOS ANÓDICOS

Se medirán las posiciones de los hilos en cada capa de una supercapa, antes de cerrarla con la plancha de aluminio correspondiente a la siguiente capa. Los hilos serán visibles desde arriba.

Será necesaria una tolerancia en la posición del hilo inferior a 500 μm por exigencias del trigger, por lo que estas medidas se realizarán con un error de $\pm 100 \mu\text{m}$ [20]. La posición de todos los hilos se registrará en la base de datos. Si la posición de un hilo estuviera fuera de tolerancia, será sustituido.

Estas medidas, como se ha visto, se realizarán con una cámara CCD instalada en el cabezal del puente principal del coordinatógrafo y conectada a un ordenador. Un programa controlará el movimiento de la cámara, que avanzará a intervalos correspondientes a la situación nominal de los hilos, es decir, una longitud de la celda (42 mm).

En cada paso de cámara se obtendrá una imagen del hilo. El tiempo necesario para medir todos los hilos de una capa será del orden de dos minutos. Se realizarán dos medidas por hilo y cerca de sus extremos, una en el lado HV y otra en el lado FE.

La posición de la cámara en cada avance se obtendrá con una resolución de 5 μm , con un codificador óptico lineal [21] asociado al coordinatógrafo (figura 8.103). La posición del hilo estará determinada por la de la cámara, más el desplazamiento del hilo en la imagen. Cuando la imagen del hilo sea nítida, el desplazamiento se obtendrá fácilmente por el método del centro de gravedad [20].

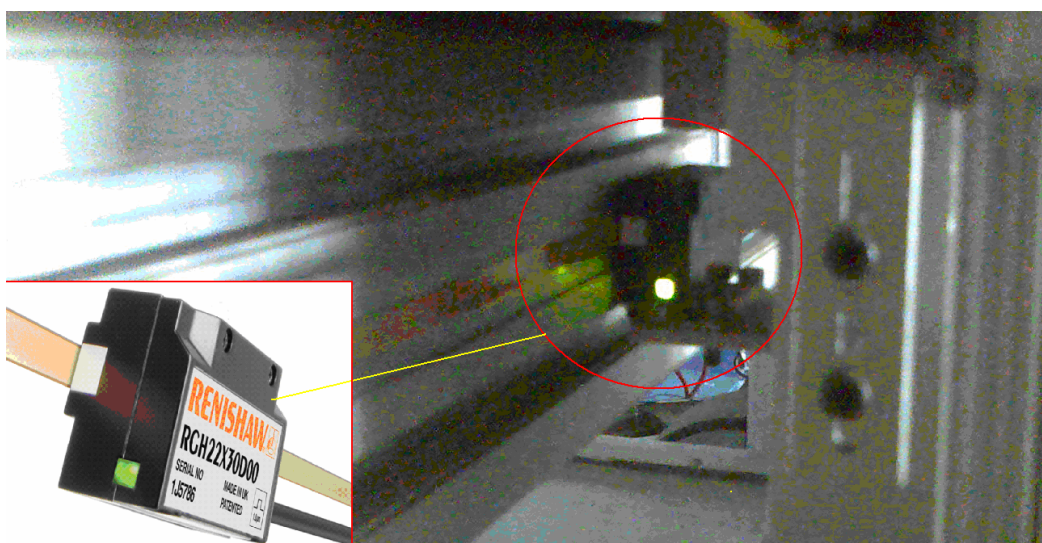


Figura 8.103.- Encoder óptico lineal Renishaw RGH22. Detalle a la izquierda

Con la óptica utilizada y un tamaño de píxel de 7 μm , la resolución del desplazamiento del hilo será menor de 15 μm . Este procedimiento necesita ser calibrado para controlar los errores sistemáticos. La precisión necesaria en estas medidas implica el conocimiento del efecto de la temperatura sobre ellas. Será necesaria, además, la calibración del sistema de medida, que se realizará con un interferómetro láser [22].

8.5.2.2.- TENSIÓN DE LOS HILOS ANÓDICOS

La tensión mecánica de los hilos se medirá una vez colocados en cada capa y permaneciendo ésta abierta. Se medirán, como se ha dicho anteriormente, con un dispositivo diseñado y fabricado al efecto: The Multi Channel Tension Meter (WTM64). Este dispositivo, controlado por ordenador, permitirá medidas simultáneas de la tensión de 64 hilos y se necesitarán aproximadamente 5 minutos para su realización.

Cuando sea necesario medir la tensión de algún hilo individualmente, antes de cerrar la supercapa, o realizar un muestreo de la tensión en una supercapa ya cerrada, se utilizará el medidor manual individual de hilos: the Single Channel Tension Meter (WTM01), introduciendo, en estos casos manualmente, los valores en la base de datos. Ambos dispositivos medirán la tensión mecánica con un error menor del 0.5 % del nominal.

El límite elástico de los hilos es de 3.5 N. Se determinará el rango de medidas de tensión válido para los mismos. Para ello se tendrán en cuenta los errores inherentes a la tensión de los hilos:

- Variación del diámetro del hilo: $\pm 1 \mu\text{m}$
- Variación del espesor del recubrimiento de oro: $\pm 0.5 \mu\text{m}$; esta variación afecta al valor de la densidad lineal en un 8 %, repercutiendo por eso en la medida de la frecuencia obtenida en el dispositivo.
- Error en la colocación del conjunto portahilos respecto a su posición nominal (-0, + 2 mm).

Considerando la combinación más desfavorable de estos errores, la tensión de los hilos deberá tener un valor medio de 3 N, siendo válidos valores para la tensión, incluyendo el error de medición (8%), entre 2.7 y 3.3 N.

8.5.2.3.- POSICIÓN DE ELECTRODOS Y VIGAS CATÓDICAS

Se comprobará, con la cámara CCD, la posición del primer electrodo de la plancha y de la primera viga de cada capa en los lados HV y FE con respecto al origen de

referencias. Estas cuatro medidas verificarán la correcta colocación de la plancha de aluminio en la mesa de precisión [20].

Tanto los electrodos como las vigas se colocarán con una tolerancia en su posición de 500 μm , para que no se vea afectada la velocidad de deriva del muón en la celda. Estas medidas se introducirán en la base de datos.

La figura 8.104 es una representación gráfica del error del posicionado de todas las vigas en una capa, determinado manualmente con un calibre digital, de precisión 0.01 mm. Se observa que el error en todas las vigas está dentro de la tolerancia indicada anteriormente.

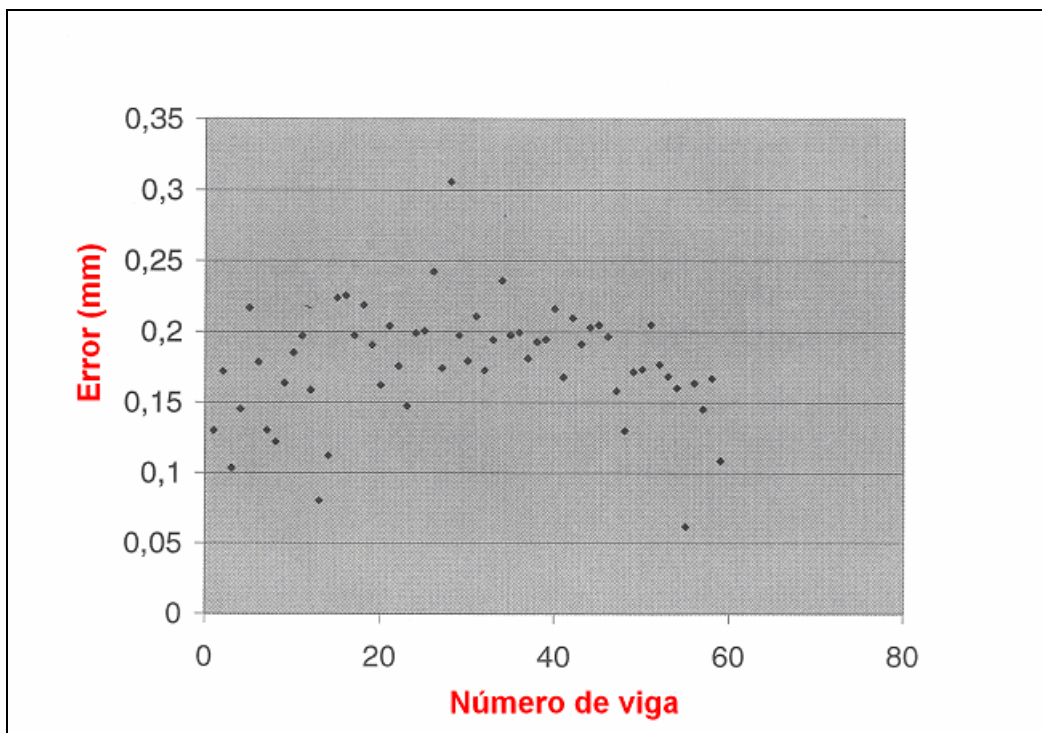


Figura 8.104.- Error en el posicionado de vigas de una capa de la supercapa P1

8.5.2.4.- POSICIÓN DE CORNER BLOCKS

Antes de pegar la última plancha de aluminio y cerrar la supercapa, los corner blocks y las vigas C eran ensamblados, como se vio anteriormente. Una vez curado el

adhesivo se medirá la distancia entre las superficies exterior de cada uno de los 4 corner blocks y su posición nominal (figura 100).

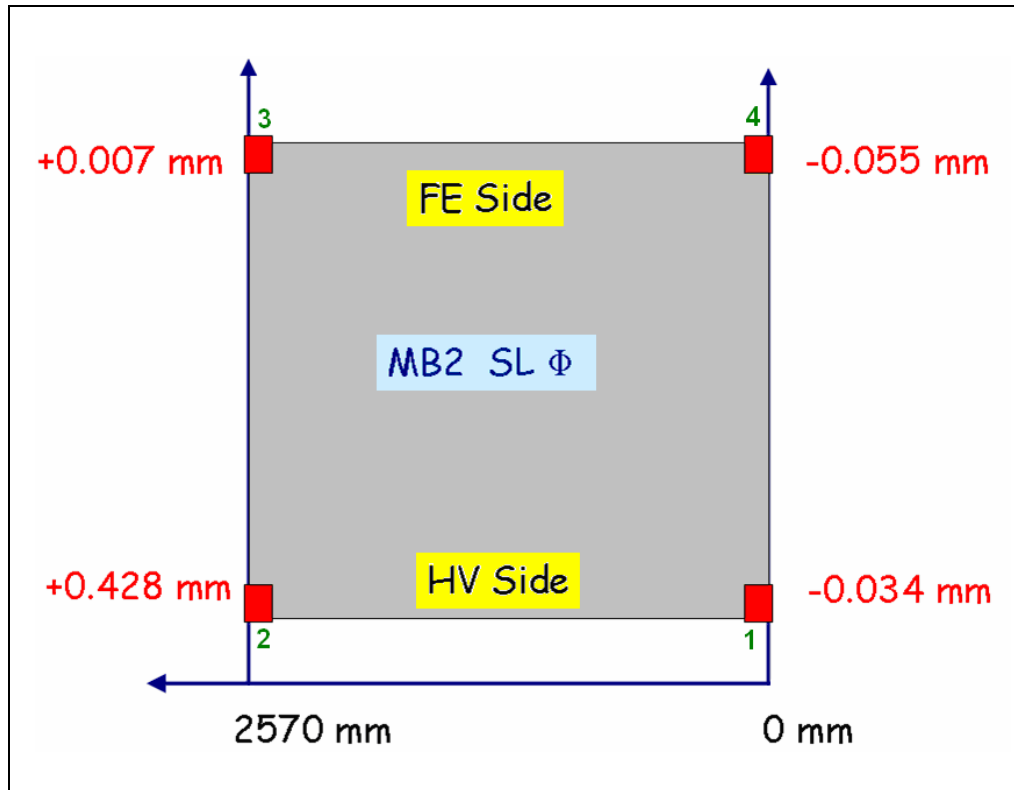


Figura 8.105.- Errores de posición de los corner blocks en una supercapa P

Estas medidas también se realizarán con el dispositivo medidor de posición de hilos (cámara CCD), y el error en las mismas deberá ser inferior a 500 μm . Los valores obtenidos serán registrados en la base de datos y serán el marco de referencia de cada supercapa (figura 8.106).

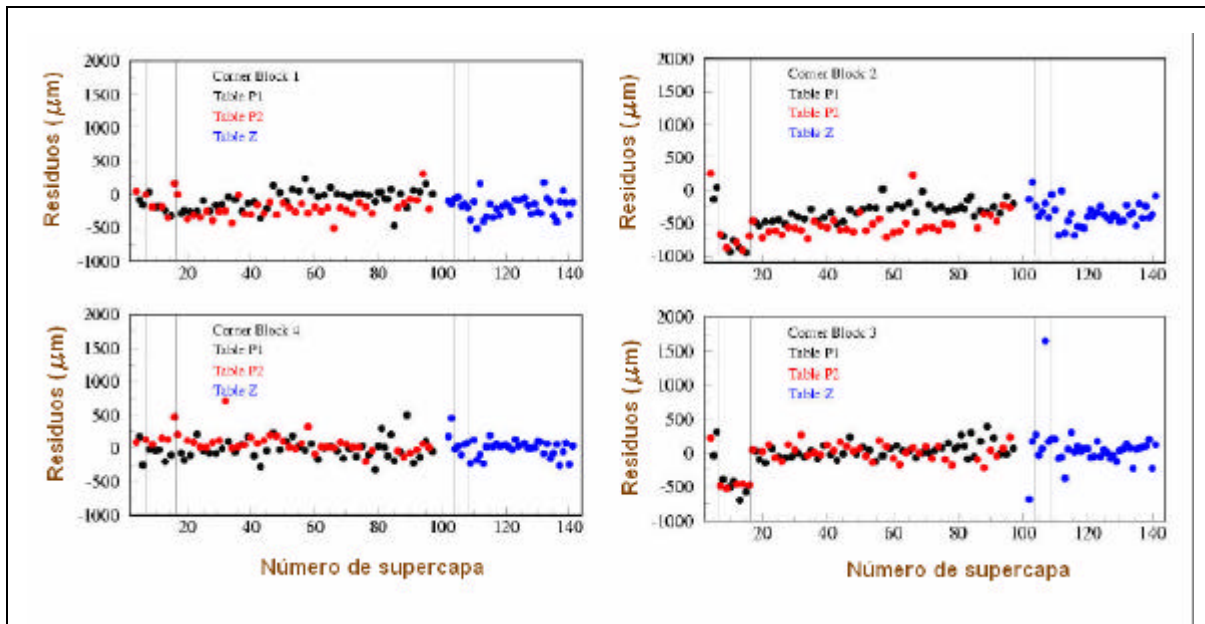


Figura 106.- Errores de posición de los corners blocks en 142 supercapas

8.5.2.5.- ADHESIVOS

En la fabricación de cámaras se utilizarán adhesivos epoxídicos de dos componentes: uno de curado rápido, Araldit 2012 (figura 8.107); y otro antigoteo (tixotrópico), empleado en el sellado de los cierres de gas, Araldit 2013.

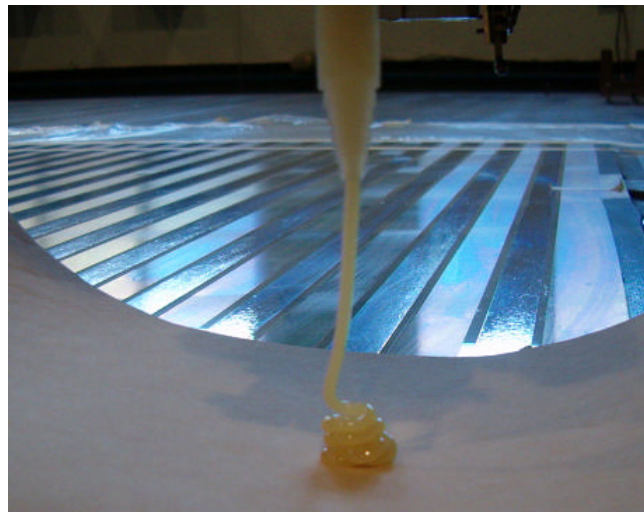


Figura 8.107.- Araldit 2012

A pesar de las especificaciones de calidad garantizadas por el suministrador, durante la producción se realizarán pruebas de calidad de los adhesivos (figura 8.108), de acuerdo al procedimiento normalizado ISO 4587:1.995 (E) descrito en la figura 8.109. En cuanto al tiempo y condiciones de almacenamiento, se seguirán las instrucciones proporcionadas por el suministrador.

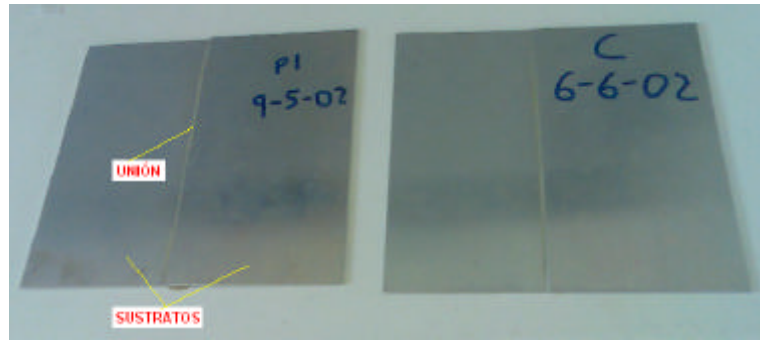


Figura 8.108.- Dos probetas utilizadas en el CIEMAT para ensayos de Araldit 2.012

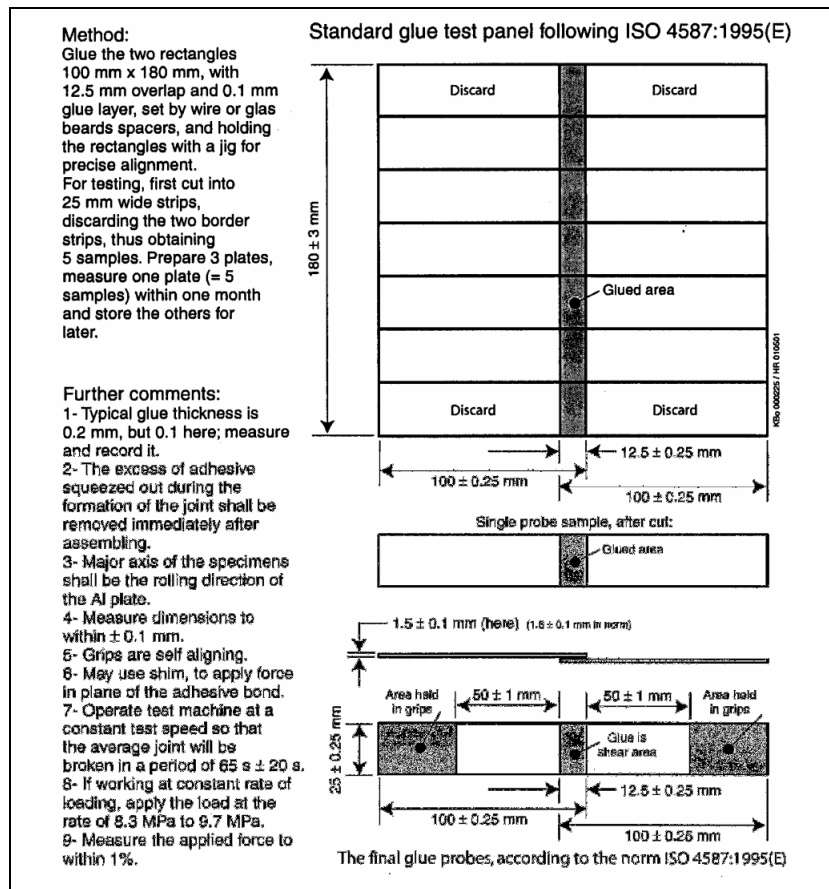


Figura 8.109.- Ensayo de calidad normalizado de los adhesivos

8.5.3- CONTROL DE CALIDAD EN SUPERCAPAS

Antes de la ensamblar las supercapas para construir las cámaras de deriva se certificará su calidad tras superar las siguientes pruebas:

- Pruebas de Alta Tensión
- Pruebas de Estanqueidad
- Toma de Datos

Estas pruebas se realizarán en las mesas de estanqueidad y en la mesa de electrónica de la nave de fabricación del CIEMAT (figura 8.110).

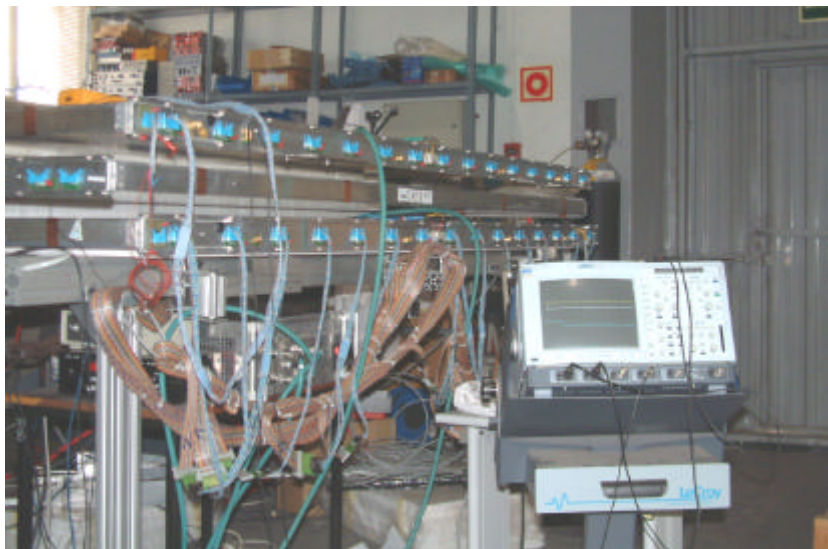


Figura 8.110.- Mesa de electrónica de la nave de fabricación del CIEMAT

8.5.3.1.- PRUEBAS DE ALTA TENSION

La primera prueba consistirá en comprobar el comportamiento de los componentes de las supercapas sometidos a alta tensión. El objetivo de estas pruebas será la localización de posibles celdas de deriva dañadas o defectuosas, errores en el cableado, falsos contactos o problemas en la electrónica de distribución de HV.

Esta prueba se realizará una vez que la supercapa se haya equipado completamente, a excepción de la electrónica de lectura, y antes de ser cerrada. Para realizarla, se utilizarán fuentes de alta tensión especialmente diseñadas para las cámaras de deriva (CAEN, módulos A876 y A877, integrados en el sistema SY1527 CAEN, prototipos de sistema final que se utilizarán en CMS [23]), que suministrarán tensión a todos los elementos de la celda a través de varios canales. A la vez que se alimentarán los distintos elementos, se monitorizarán las corrientes en cada canal.

Para detectar con mayor claridad las incidencias, este test de alta tensión en aire se efectuará con la supercapa abierta. En primer lugar, se alimentará cada tipo de canal (electrodos, cátodos e hilos) por separado, hasta llegar a una tensión de 2.000 V. A continuación, se aumentará la tensión progresivamente, hasta alcanzar los valores de 4.000 V, 2.000 V y -2.000 V para hilos, electrodos y cátodos respectivamente. Siempre se controlarán las corrientes inducidas en cada canal, que normalmente, presentarán valores inferiores a 100 nA.

Estos valores descenderán gradualmente, a medida que transcurre el tiempo que los elementos permanecen sometidos a alta tensión. Si algún canal presentara valores superiores a los esperados o pequeñas descargas visibles (chispas), será una señal inequívoca de anomalías en alguna de las celdas o en la electrónica. Al hacer este primer test con la supercapa abierta, permitirá acceder a cada canal de forma individual, por lo que con ayuda del instrumental necesario se podrá desconectar celda por celda hasta encontrar el problema. Para certificar la estabilidad de la supercapa, se deberá dejar a tensión durante varias horas (12 horas), ya que transcurrido este tiempo las pequeñas corrientes por elementos ajenos a la supercapa, como el polvo o la humedad, desaparecerán.

Esta prueba se repetirá con la supercapa cerrada e instalada la electrónica de lectura y una vez introducido el gas adecuado para el correcto funcionamiento de la cámara de deriva. El gas que se utilizará será una mezcla de argón (85%) y CO₂ (15%). La proporción de aire para que este test sea válido ha de ser inferior a 500 ppm de O₂, para lo cual se dejará el gas circulando por su interior varias horas. Los valores de las tensiones suministradas en este caso, serán ligeramente superiores a las nominales de operación de la celda en gas e inferiores a las utilizadas en aire (3.600, 1.800,-1.400), ya que los valores de

las tensiones aplicadas en aire podrán suponer un incremento del campo eléctrico en la celda, que la podrá hacer alcanzar el régimen de descarga [24].

Con esta prueba se pueden detectar incidencias que no han sido observadas con pruebas en aire. Las actuaciones en este caso serán más complejas, ya que, al estar la supercapa cerrada, no habrá acceso a los canales de forma individual. Las anomalías observadas podrán ser muy variadas y originadas por diversas causas. Se deberán principalmente a defectos en el interior de la celda (electrodos dañados, elementos extraños introducidos accidentalmente, etc.) o a problemas en la electrónica (contactos defectuosos, tarjetas defectuosas, etc.). La mayor parte de estas incidencias pueden ser corregidas. En caso contrario, la celda o celdas afectadas serán desconectadas. El número máximo de celdas desconectadas no deberá superar el 5% del total de la supercapa según los criterios establecidos por la Colaboración [20].

En la figura 8.111 se muestra el número de canales desconectados por cámara de todas las fabricadas en el CIEMAT. Se observa que salvo en la cámara 16 (8 celdas desconectadas), no se supera el 1% de canales desconectados por cámara, que en el caso de una tipo MB2 con 703 celdas serían 7, muy inferior a las 35 correspondientes al máximo permitido (5%). La mayoría de los defectos encontrados fueron debidos a electrodos o cátodos dañados en el transporte o durante el proceso de fabricación de la supercapa.

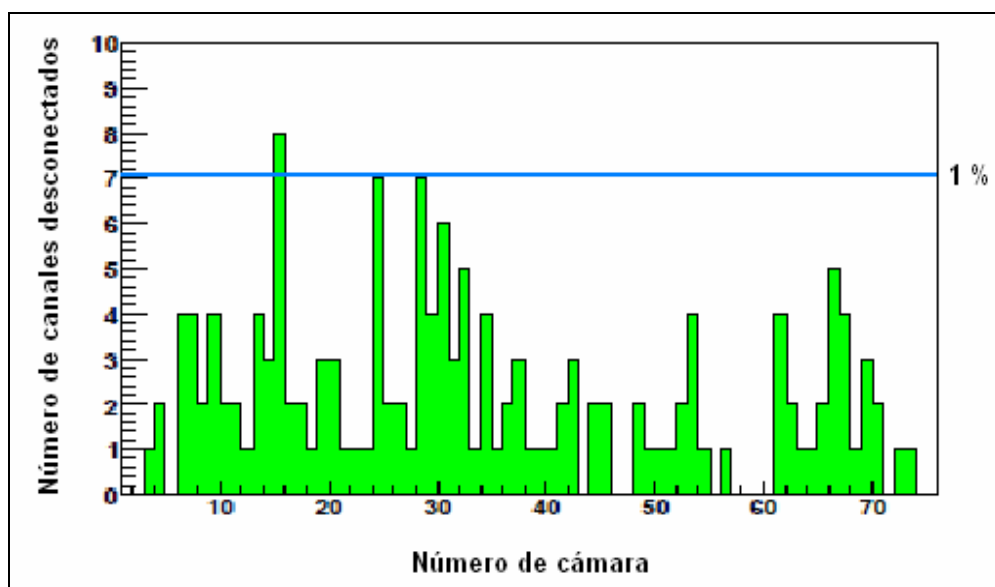


Figura 8.111.- Canales desconectados en todas las cámaras fabricadas en el CIEMAT

8.5.3.2.- PRUEBAS DE ESTANQUEIDAD

En la mesa de estanqueidad, y durante la fabricación de la supercapas, se realizará una primera estimación de la estanqueidad de las mismas con tapas HV y FE provisionales, de igual forma a como se establecerá a continuación con las supercapas completamente ensambladas en la mesa de electrónica. El gas utilizado en esta primera prueba será CO₂.

La estanqueidad de la supercapa es fundamental para que el detector pueda funcionar con un flujo total de gas lo más bajo posible, sin que existan pérdidas de gas importantes (fugas) que incidan en la pureza de la mezcla. El flujo nominal de funcionamiento en CMS se regulará, para garantizar aproximadamente un cambio total del volumen del gas en las cámaras de deriva cada 24 h.

Para evaluar la calidad de cada supercapa en relación a su estanqueidad, ésta se llenará con el gas con el que funcionará CMS (85 % Ar + 15 % CO₂). Este gas entrará a través de un conector, estando conectada a una columna de agua la salida de gas mediante otro conector, hasta que se alcance en ella una presión de 50 mbar por encima de la presión atmosférica. Dicha sobrepresión disminuirá a lo largo del tiempo, según una ley exponencial:

$$P(t) = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (8.2)$$

donde:

$P(t)$ es la presión al cabo de un tiempo t

P_0 es la presión inicial

τ es la constante de tiempo

La constante de tiempo será tanto mayor cuanto más estanca sea la supercapa. Los criterios de calidad establecidos por la Colaboración, imponían una constante de tiempo mínima de 120 minutos.

Para medir τ se observará la disminución de la sobrepresión durante al menos 30 minutos. Para ello, a intervalos de varios minutos hasta completar la media hora, se

registrarán manualmente los valores de la sobrepresión y el tiempo transcurrido. A continuación, mediante un ajuste lineal, se obtendrá su valor (figura 8.112).

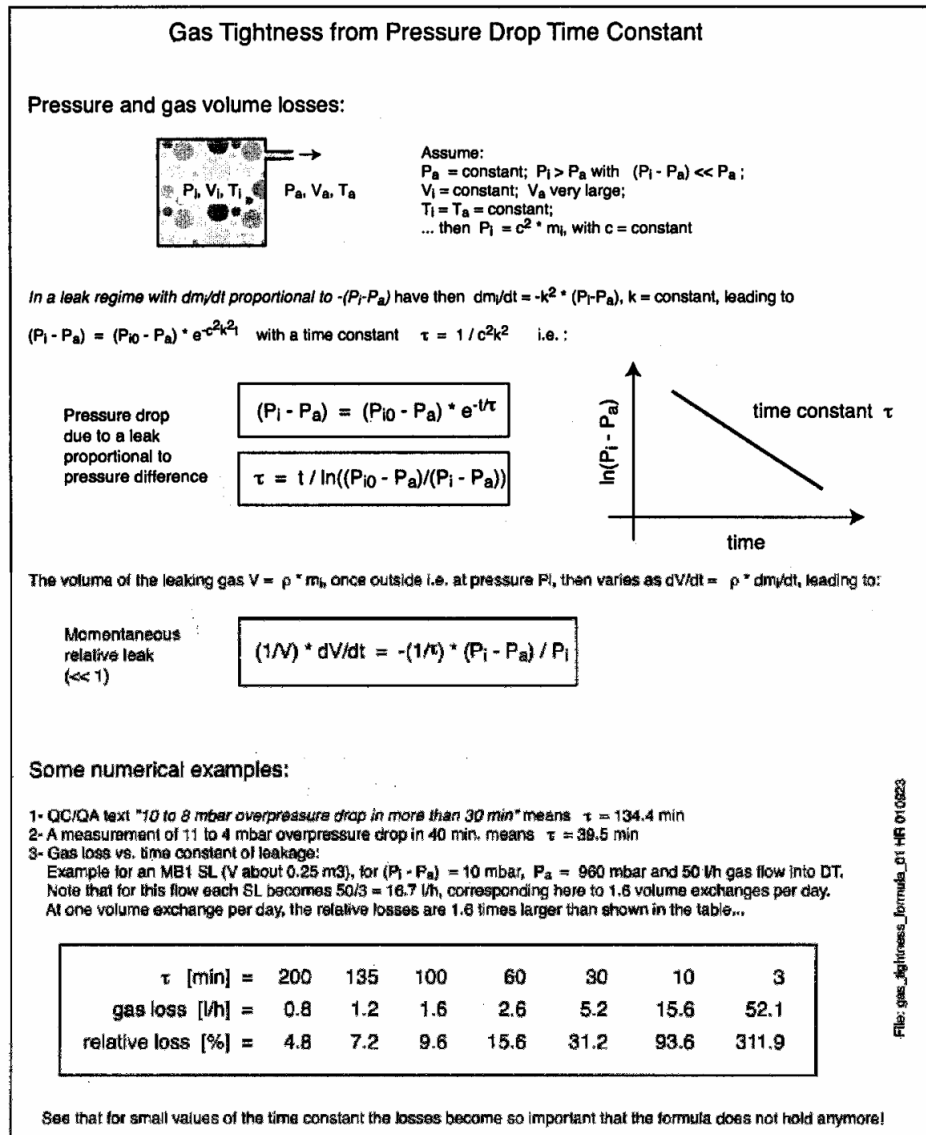


Figura 8.112.- Medida y cálculo de la constante de tiempo

En caso de que la supercapa no cumpla con los criterios de calidad, se procederá a investigar los posibles puntos de escape del gas con un dispositivo detector de fugas. Estas fugas serán las causantes de la pérdida de presión, y pueden tener su origen en el pegado defectuoso de alguno de los componentes de la supercapa, en un defecto de la junta tórica de sellado, en un fallo de colocación en el pegado de los marcos, etc.

Las fugas de gas una vez localizadas son posteriormente corregidas mediante recubrimiento con adhesivo (Araldit 2013), volviéndose a repetir a continuación el test a la supercapa. Si una supercapa tiene que abrirse una vez superada la prueba de gas, es necesario repetirla tras su nuevo sellado. La figura 8.113 muestra las constantes de tiempo medidas en todas las supercapas de las cámaras fabricadas en el CIEMAT.

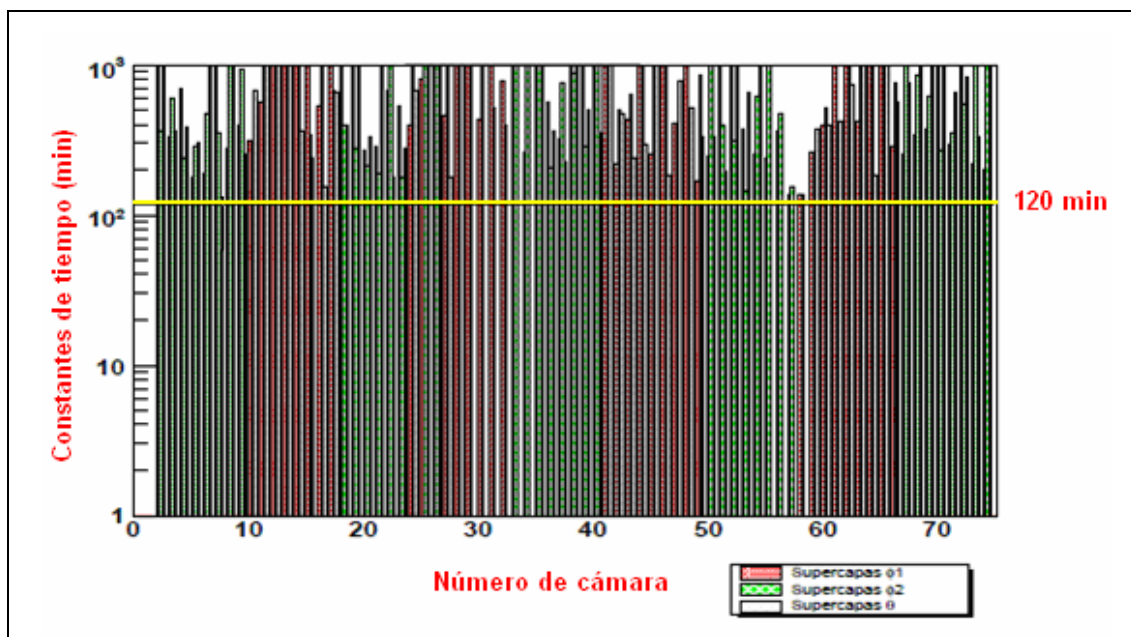


Figura 8.113.- Constantes de tiempo por supercapas de las cámaras fabricadas

A la vista de la figura anterior, se puede concluir que todas las supercapas fabricadas tienen constantes de tiempo que superan los 120 minutos; por tanto, han superado las pruebas de estanqueidad.

8.5.3.3.- TOMA DE DATOS

El proceso de control de calidad de supercapas se completará con una serie de tests de toma de datos cuyo objetivo será: por un lado, validar la electrónica de lectura instalada en la cámara (tarjetas FE, conectores, etc.); por otro lado, identificar y solucionar, con ayuda de estos datos, anomalías que no hayan podido ser observadas con anterioridad. Estas pruebas se dividirán en tres bloques:

- PRUEBAS CON PULSOS

Antes de cerrar el lado FE de una supercapa, y después de realizar la prueba de estanqueidad, se probará la electrónica de lectura y, en paralelo, su sistema de control, junto con los cables y conectores del lado FE. La prueba se realizará antes de cerrar la supercapa para detectar problemas de montaje o de componentes defectuosos, repitiéndose con la supercapa cerrada para detectar problemas asociados a la operación de cierre, ya que el escaso espacio libre y la fragilidad de algunos componentes hará que el cierre de la supercapa sea un proceso complejo.

El propósito de esta prueba es comprobar que la electrónica de lectura funciona correctamente. Para ello, se introducirán una serie de pulsos que se repartirán a través de unos conectores a todos los canales de las tarjetas FE (figura 8.114). Se comprobará si existe respuesta de salida y, además, si ésta tiene la forma y duración de pulso esperadas (figura 8.115).

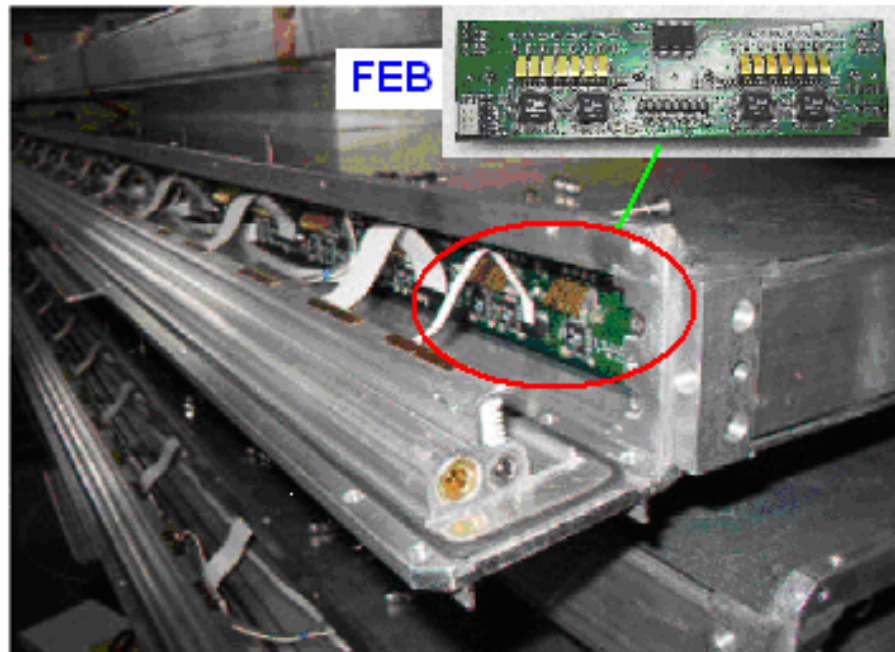


Figura 8.114.- Supercapa por el lado FE con la tapa abierta y detalle de una FEB

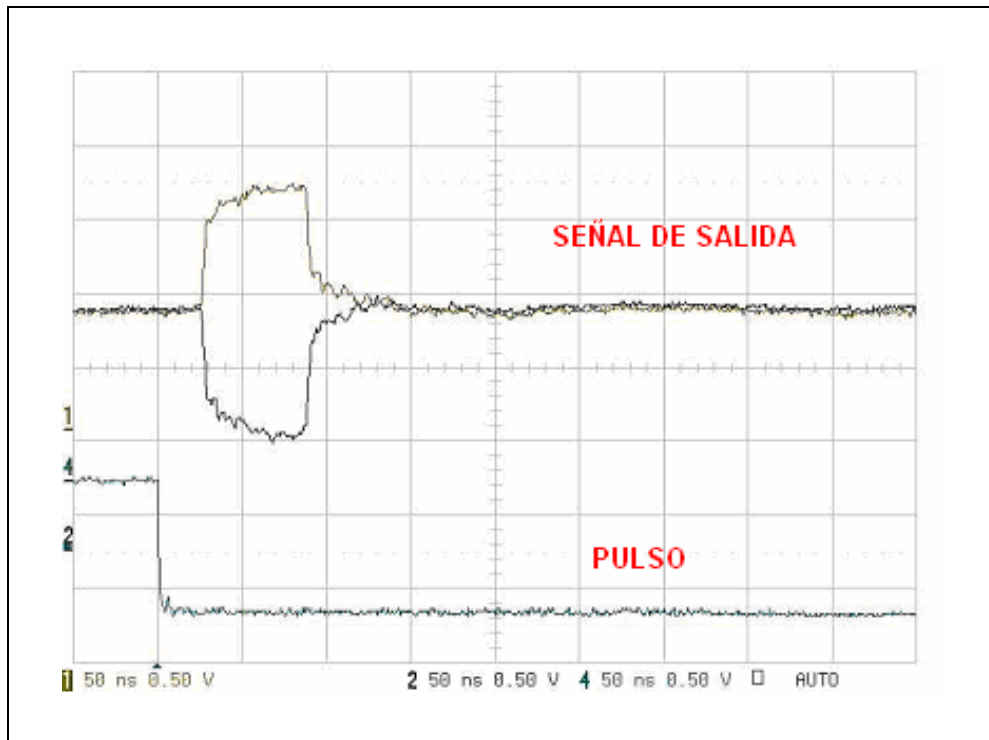


Figura 8.115.- Señal del osciloscopio al introducir un pulso en una supercapa

En caso contrario, habrá que verificar si existen problemas debido a fallos en los circuitos de las tarjetas FE (FEB), contactos defectuosos, cortocircuitos, defectos en los conectores de señal, etc. Los problemas asociados al lado FE suelen ser de fácil solución, bien corrigiendo el problema existente, o bien sustituyendo los elementos defectuosos. Salvo casos muy excepcionales, no se suelen producir pérdidas de canales por problemas en la electrónica de lectura.

Se comprobará (figura 8.116) si el sistema de control detecta las FEBs, si la lectura de temperaturas de éstas es correcta y si el enmascaramiento de canales funciona [3]. El enmascaramiento, durante la operación del detector, evitará que los canales con mucho ruido provoquen la pérdida de señales válidas, llenando las memorias intermedias del sistema de adquisición de datos.

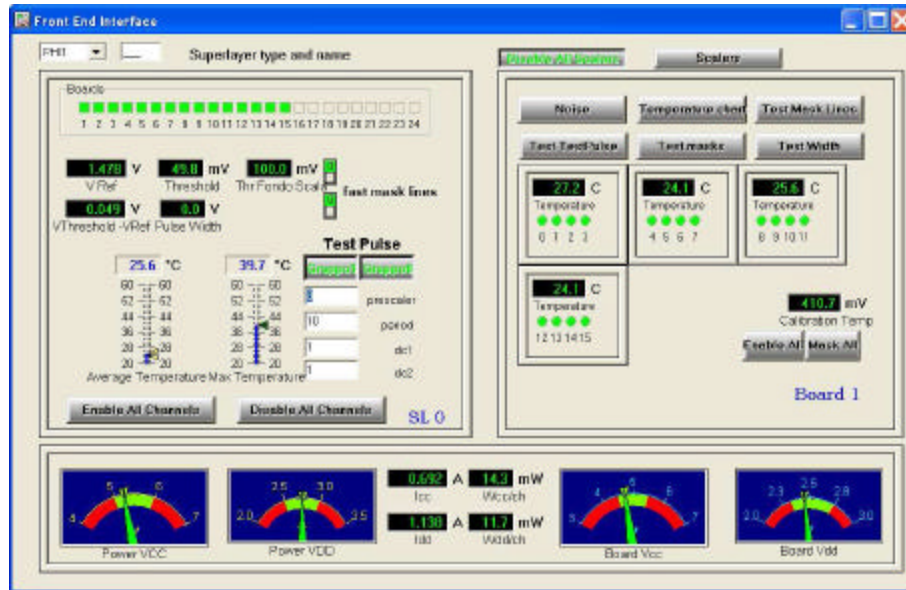


Figura 8.116.- Sistema de control de la electrónica de lectura (Slow Control)

- PRUEBAS DE RUIDO

El nivel de ruido intrínseco propio de cada canal, es decir, la tasa de señales no debidas a partículas que atraviesan la celda, suele ser inferior a 50 Hz/celda. Si el nivel de ruido es muy superior a este valor, el sistema puede sufrir importantes deficiencias debido a que un número demasiado elevado de señales no puede ser procesado por la electrónica de lectura, y puede provocar pérdidas locales de información.

También hay que destacar que, a efectos de trigger, el ruido puede inducir señales falsas en el sistema. Por ello, es importante comprobar el nivel de ruido de la supercapa y, en caso necesario, corregir las causas que lo originan si éste es muy elevado.

Para estudiar el nivel de ruido, se extraerán las señales de la supercapa y se conducirán hasta TDCs (Time to Digital Converter), utilizando como referencia un trigger aleatorio externo [3]. En la figura 8.117 se aprecia el número de celdas con un determinado nivel de ruido medidas en una supercapa. El nivel medio de ruido electrónico se situará en 50 Hz, como se dijo con anterioridad.

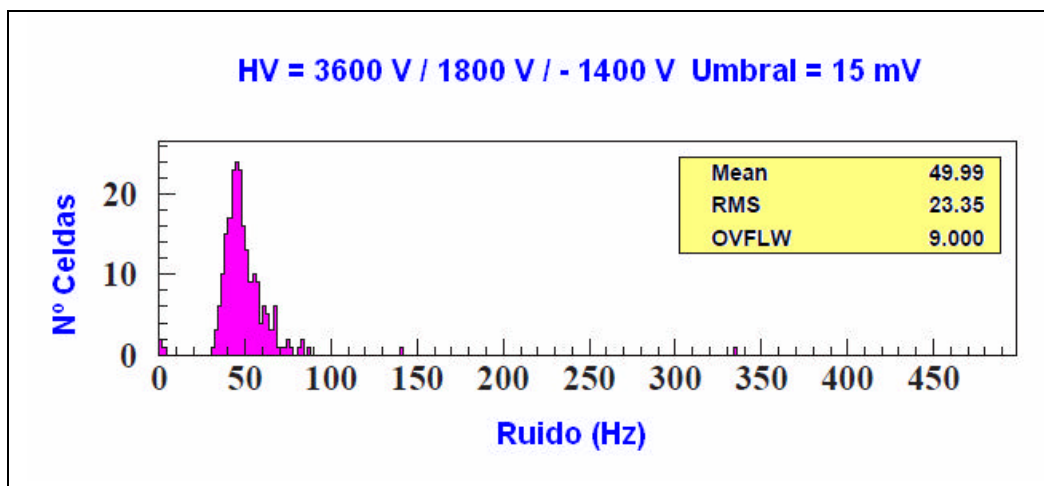


Figura 8.117.- Ruido en todas las celdas de una supercapa

Un nivel de ruido elevado, asociado a determinadas celdas, podrá ser debido a: problemas de alta tensión en algún canal, que provoquen ciertas corrientes en las mismas; ruido introducido por la propia fuente de alta tensión; fallos de las propias FEB; o conexiones a tierra defectuosas. Para localizar el origen del ruido se repetirá la prueba, para diferentes tensiones de amplificación, para diferentes umbrales de discriminación y sin alimentación de alta tensión.

Experimentalmente, se observará que el ruido disminuye considerablemente con el paso del tiempo, siempre que en la supercapa exista un flujo de gas elevado y esté conectada la alta tensión; pues, en estas condiciones, las impurezas del interior de las celdas desaparecerán, estabilizándose el detector [3]. Además, una vez fabricada la cámara, se mejorarán las conexiones a tierra, reduciéndose en consecuencia el nivel de ruido.

- PRUEBAS CON RAYOS CÓSMICOS

La supercapa pasará una última prueba de toma de datos, detectando muones procedentes de la radiación cósmica, es decir, utilizándolos como trigger. Como señal de trigger externo se utilizarán dos plásticos centelleadores, conectados a cuatro fotomultiplicadores (uno en cada extremo de los plásticos) situados debajo de la mesa de electrónica.

La coincidencia de señales en uno de los plásticos de centelleo, iniciará la adquisición de datos procedentes de la supercapa conectada a TDCs, que recogerán las señales de salida de las FEBs. El dispositivo experimental (figura 8.118), nos permitirá detectar dos millones de sucesos, suficiente para analizar el comportamiento de todas las celdas de cada supercapa [25].

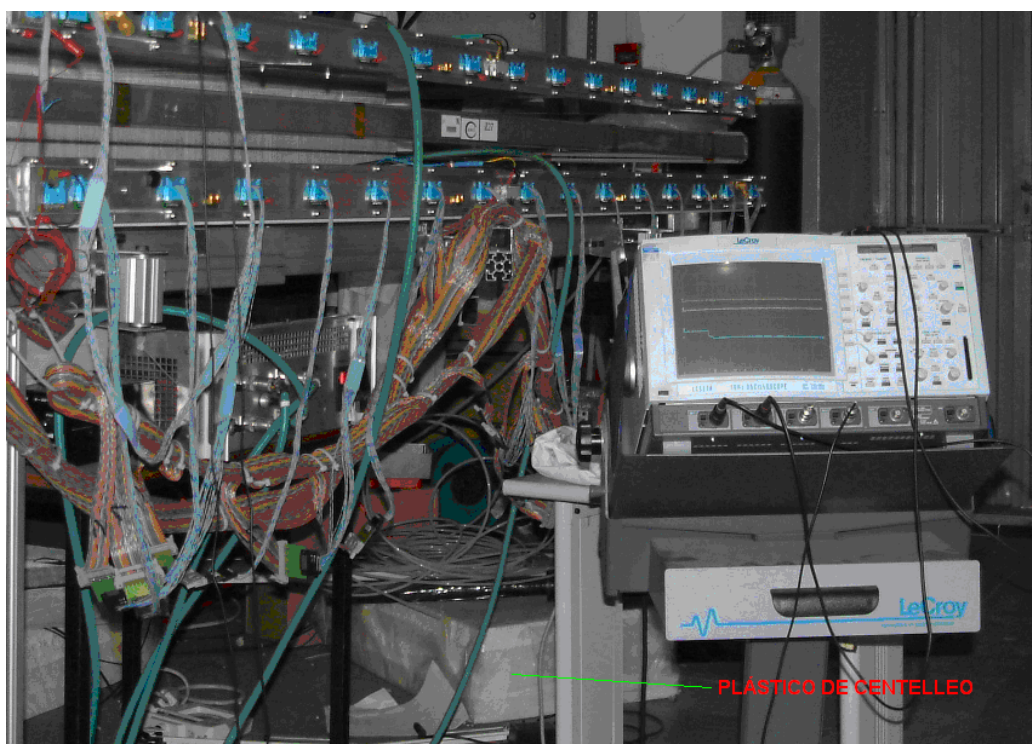


Figura 8.118.- Instalación experimental para toma de datos

En la figura 8.119 se muestran las eficiencias medias en la detección de muones cósmicos por capas, para todas las supercapas de las cámaras fabricadas en el CIEMAT. Se observa que las eficiencias se encuentran por encima del 98 % salvo para la cuarta capa, consecuencia de la difusión del gas, ya que será la última en donde se alcanza la pureza óptima tras la circulación del gas, debido al tiempo limitado de la prueba.

Experimentalmente se comprobará que después de mantener un flujo alto de gas durante varios días, el comportamiento de todas las capas es equivalente [25].

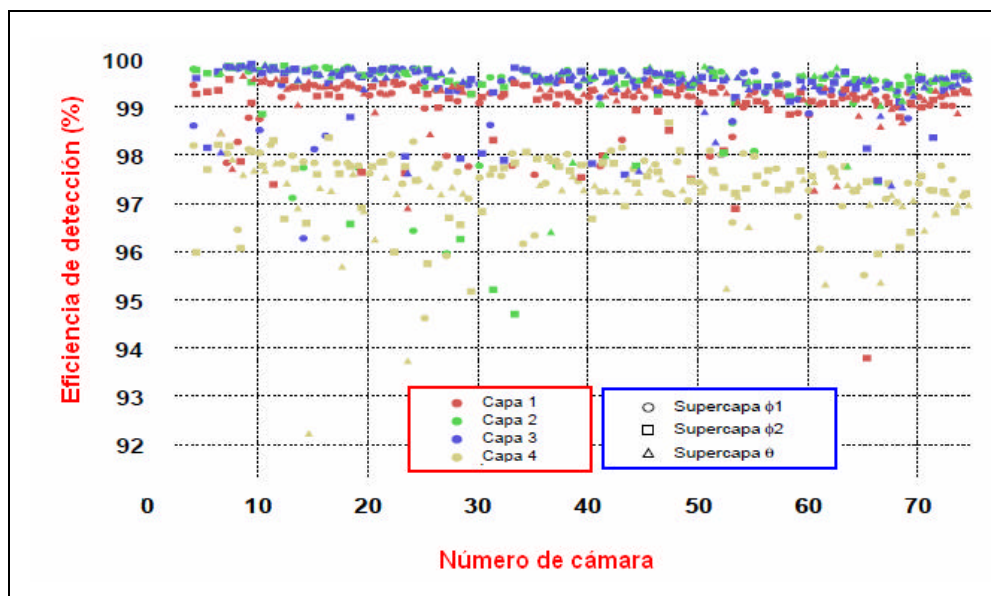


Figura 8.119.- Eficiencia por capas de las cámaras de deriva fabricadas

8.5.- PRODUCCIÓN

El proceso de fabricación de una supercapa estará limitado por el tiempo de curado de los adhesivos utilizados en el ensamblado de las cuatro capas que la forman. El tiempo mínimo de curado de los adhesivos será de 12 horas a temperatura controlada, por lo que no se realizará más de una operación de pegado por día.

Utilizando la técnica del doble pegado antes descrita, se fabricarán 2 supercapas por semana. Se podrá realizar esta operación, simultáneamente, en dos mesas de precisión de las tres disponibles (una supercapa en cada mesa). El control de calidad postproducción se realizará de acuerdo a la experiencia acumulada, en un tiempo máximo de dos semanas por supercapa, realizándose las pruebas a tres supercapas simultáneamente. Estas tres supercapas serán en el caso más desfavorable, de fabricación de cámaras MB2, las necesarias para su fabricación.

Contabilizando las tres operaciones de pegado involucradas en el ensamblado de cámaras y los tiempos de curado en las mismas, se necesitará una semana adicional para completar la fabricación de una cámara de deriva. En definitiva, el tiempo de fabricación estimado será de 2 cámaras por mes.

8.6.- CALENDARIO DE EJECUCIÓN

Una producción de dos cámaras por mes representará un trabajo continuado para la fabricación de 70 cámaras de 35 meses. Se aplicará un factor de corrección de 3 meses de inactividad por año, así como un factor de retraso del 10 % por imprevistos, lo que supondrá un período total de fabricación continuado de 4.5 años.

La producción en serie de cámaras de deriva, en el CIEMAT, comenzó en Abril de 2.001 con un plazo de finalización en Octubre de 2.005. La última de las 200 supercapas se terminó de fabricar en mayo de 2.005. En la figura 8.120 se compara el tiempo invertido en la producción real de supercapas y el previsto, incluyendo las supercapas correspondientes a las cuatro MB2 de repuesto.

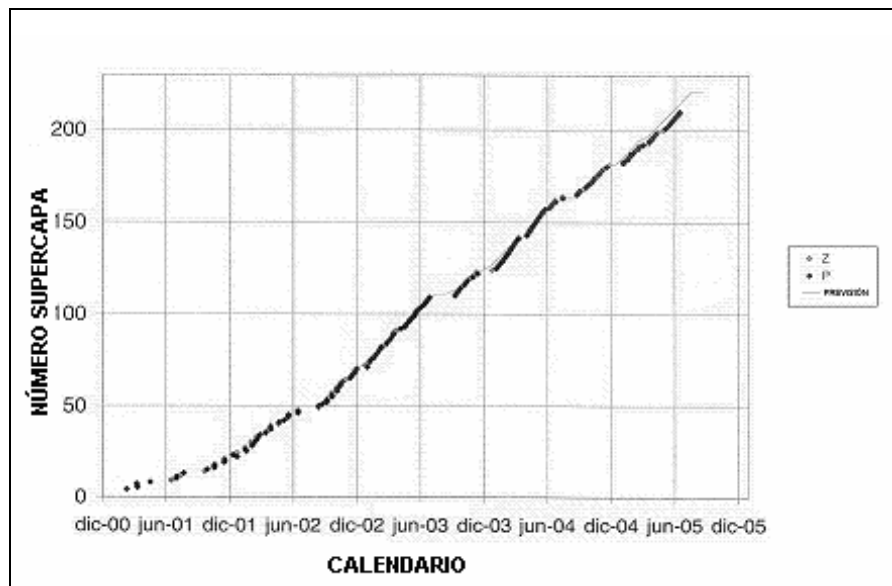


Figura 8.120.- Producción real y prevista de supercapas en el CIEMAT

En las figuras 8.121 se detalla el calendario de la fabricación de los dos tipos de supercapas por separado, y en la 8.122 se aprecia el calendario de ejecución de las 74 cámaras de deriva fabricadas.

Se determinó además, con la experiencia a lo largo de estos años, que el número óptimo de operarios en planta será de cuatro, frente a los tres recomendados después de la fabricación de los prototipos MB96 y Q4 [2].



Figura 8.121.- Calendario de fabricación de supercapas en el CIEMAT

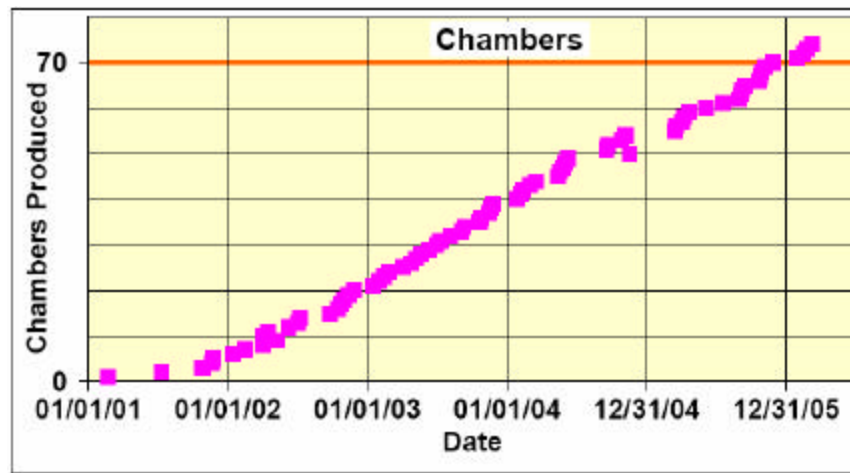


Figura 8.122.- Calendario de fabricación de cámaras en el CIEMAT

8.7.- TRANSPORTE

A medida que las cámaras de deriva pasen el control de calidad, se prepararán (figura 8.123) y colocarán en el útil de transporte, que tendrá una capacidad máxima para 5 cámaras (figura 8.124). Se realizarán envíos periódicos por carretera al CERN, en lotes de 4 ó 5 cámaras por desplazamiento (figura 120).



Figura 8.123.- Preparación de cámara para su almacenamiento en el útil de transporte



Figura 8.124.- Carga de cámaras en el útil de transporte



Figura 8.125.- Útil preparado para el envío de 5 cámaras de deriva al CERN

El útil de transporte será una estructura soporte compartimentada, diseñada en el CIEMAT [26]. La estructura estará formada por una base y dos soportes laterales con patas, para el aseguramiento de las cámaras (figura 8.126). Se utilizarán en su fabricación fundamentalmente perfiles UPN y placas de hierro (F-112). Las dimensiones del útil se adaptarán al espacio de carga de los camiones utilizados para el transporte.

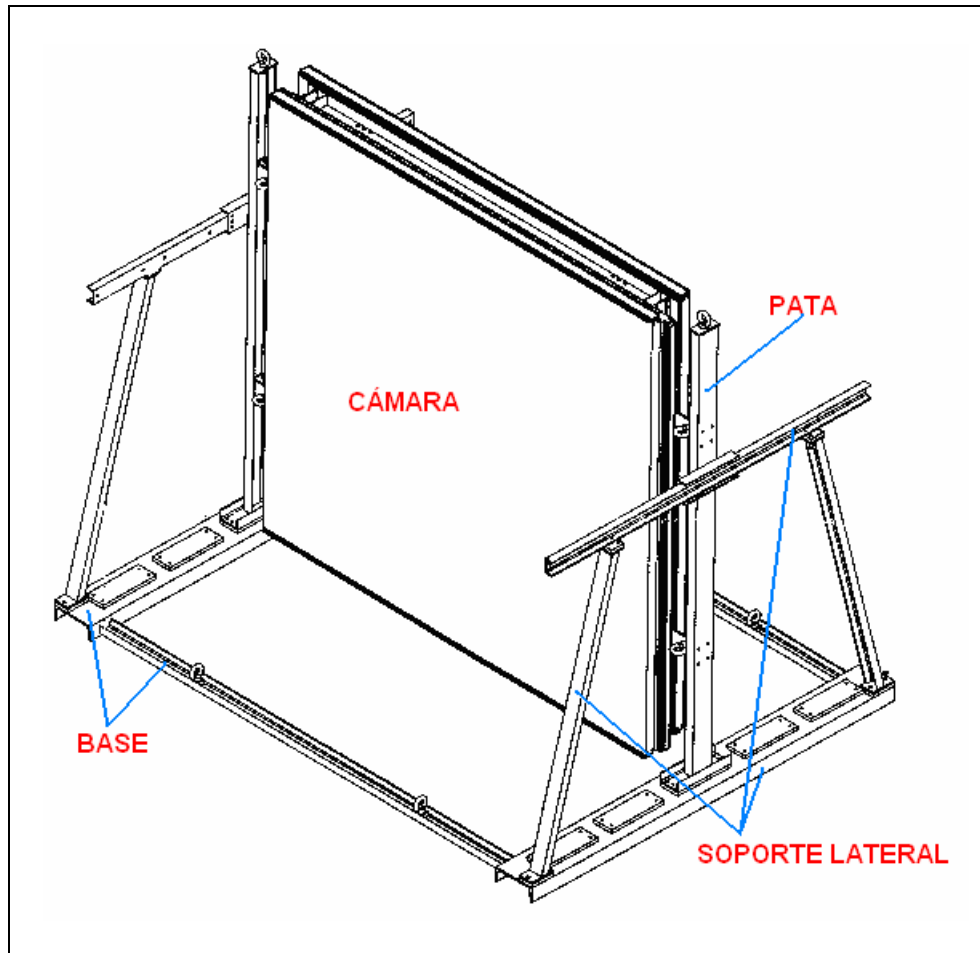


Figura 8.126.- Elementos de la estructura de transporte

8.8.- ALMACENAMIENTO Y CONTROL

Una vez transportadas al CERN las cámaras se almacenaron en el área ISR (Intersecting Storage Rings), situada en el túnel de este antiguo acelerador (figura 8.127), siendo sometidas de nuevo a controles de calidad similares a los realizados en el CIEMAT.

Estas pruebas se realizaron para verificar su funcionamiento, a las condiciones de altitud y humedad en el lugar de instalación, y solucionar posibles anomalías derivadas del transporte por carretera. Los controles finalizaron en Octubre de 2.006.



Figura 8.127.- Zona ISR de almacenamiento y control en el CERN

En paralelo se realizó la calibración de las cámaras para el alineamiento, instalándose el instrumental para el sistema LINK [28], que relacionará de forma precisa las posiciones de las cámaras de deriva con respecto al detector central de trazas (figura 8.128).

Además se realizó la medida de las posiciones relativas entre supercapas para cada cámara, con un sistema fotogramétrico que medía las posiciones de los corner blocks con un error de 50 μm .



Figura 8.128.- Detalle del banco de calibración con una cámara MB2

El paso siguiente fue la colocación del sistema definitivo de distribución del gas, los cables de HV, la electrónica de adquisición de datos y el sistema de refrigeración. Finalmente, se ensamblaron con las cámaras RPCs (Resistive Plate Chambers) que también formaban parte del detector global y se transportaron al punto de interacción 5 (Cessy. Francia) del anillo de LHC, para su instalación definitiva en el detector CMS.

8.9.- INSTALACIÓN EN EL DETECTOR

Las cámaras de deriva se instalaron en el detector mediante un útil de inserción diseñado al efecto. La primera prueba de inserción de una cámara de deriva (MB2) en el detector se realizó en septiembre de 2.002 con resultados satisfactorios (figura 8.129).

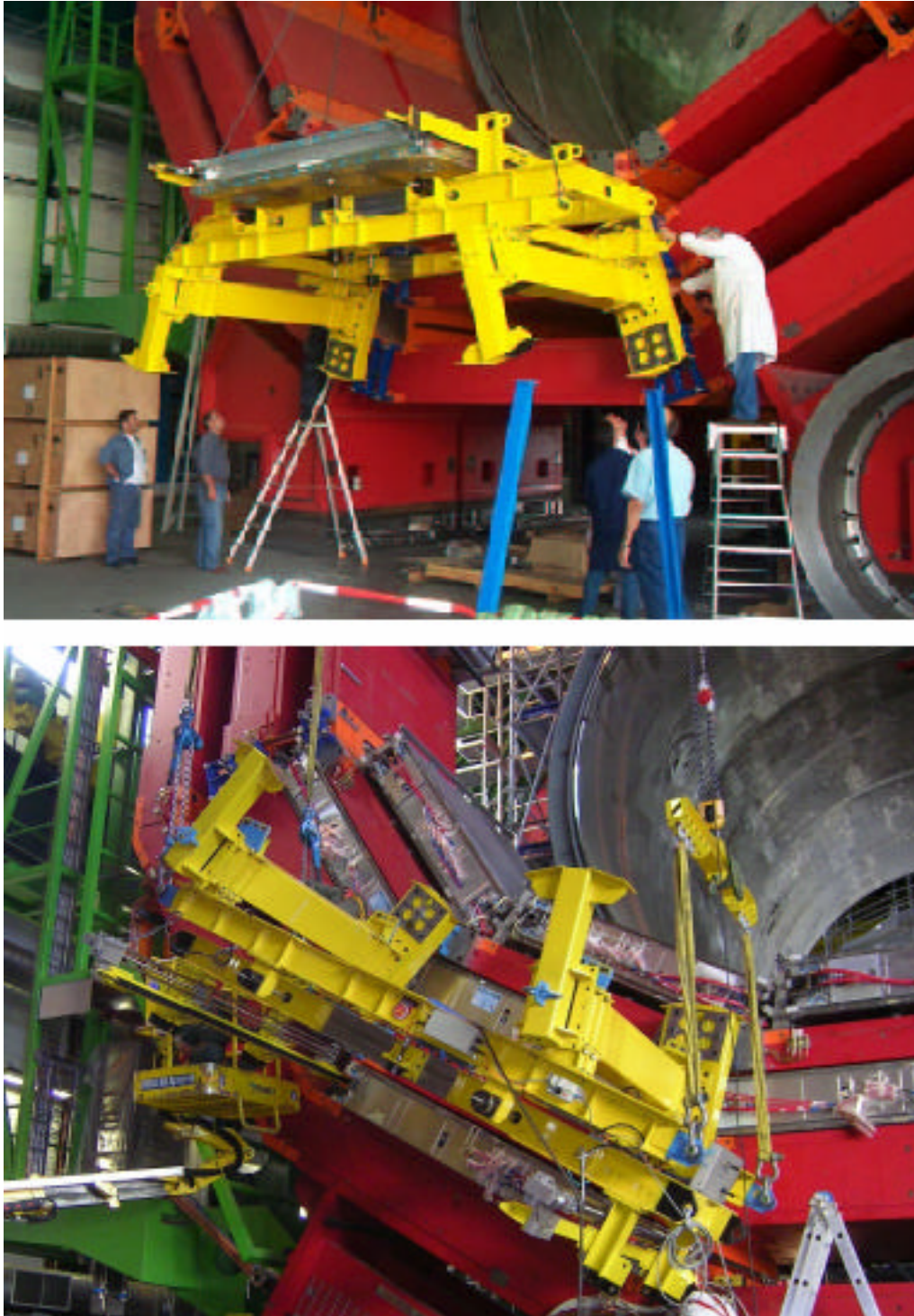


Figura 8.129.- Inserción de cámaras en el detector. Imagen superior, primera prueba

Durante los primeros meses del año 2004 comenzó la instalación de las cámaras de deriva en su emplazamiento definitivo en el detector. En primer lugar se instalaron 210 cámaras de deriva en todas las estaciones, excepto en la 1 y la 7, ya que los alojamientos de estas cámaras en la ruedas fueron utilizados por las grúas para bajar y colocar las cinco

ruedas en su emplazamiento subterráneo definitivo, en el túnel de LHC, en febrero de 2.007 (figura 8.130).

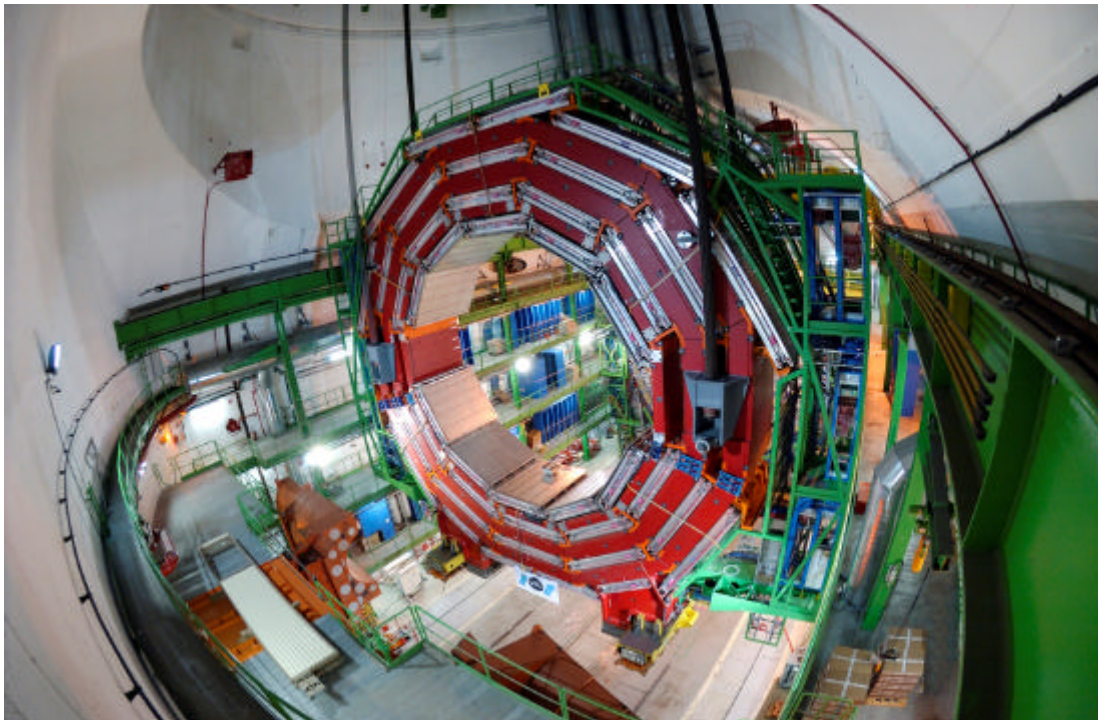


Figura 8.130.- Bajada de una rueda del detector CMS al túnel

Las 40 cámaras restantes fueron instaladas directamente en el área experimental subterránea (figura 8.131). A todas las cámaras de las ruedas se les hicieron controles definitivos (electrónica y toma de datos) una vez instaladas en el túnel.

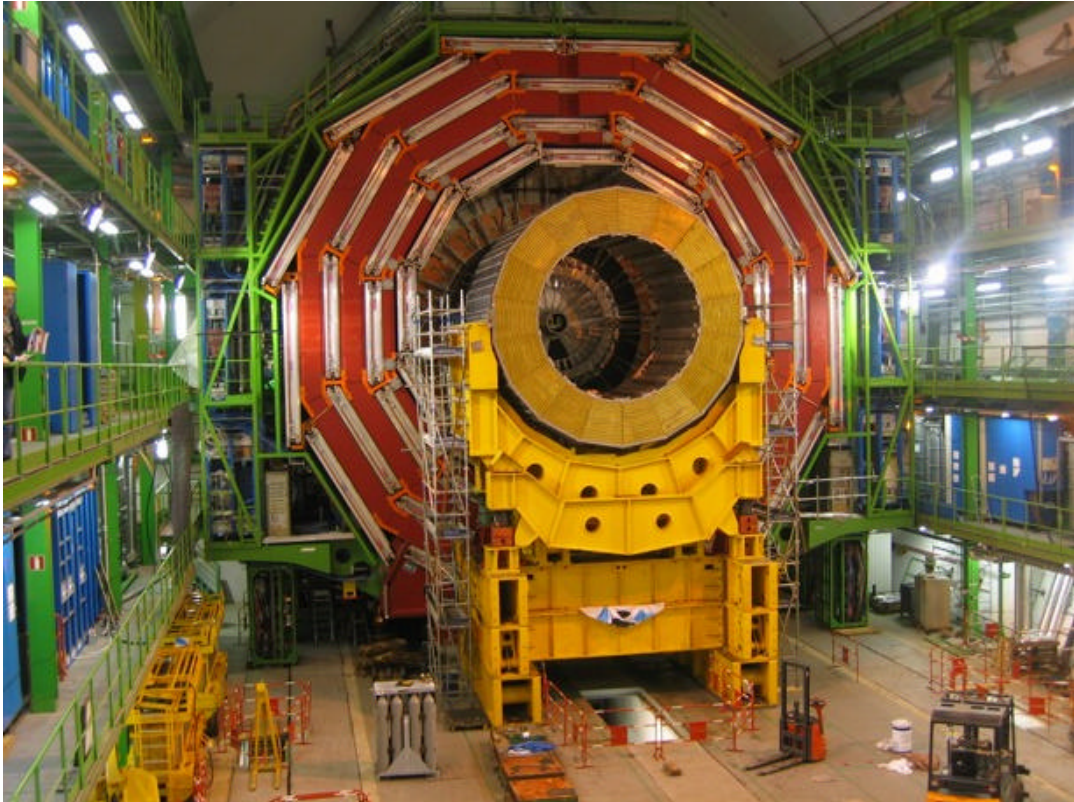


Figura 8.131.- Rueda del detector CMS en el túnel con todas las cámaras

8.10.- FUNCIONAMIENTO

El 10 de Septiembre de 2008 se puso en marcha el LHC. Se inyectaron en el acelerador haces de prueba de protones a una energía de 0.5 TeV sin interaccionar. El 19 de septiembre, en la prueba del ultimo sector del túnel (3-4) con haces a 5.5 TeV, saltó un arco eléctrico entre dos imanes superconductores bipolares, que perforó la envoltura de helio originando una fuga desde la cámara aislante al túnel del LHC, dañando 30 imanes además de saltar por sobrepresión interior una puerta blindada del mismo. Debido a este accidente, se paró el LHC.

Desde entonces se están estudiando las previsiones para evitar este tipo de accidentes en todo el acelerador, así como sustituir los equipos deteriorados. Se estima que se tardará varios meses en esta operación. El LHC podrá estar operativo a finales de septiembre de 2.009, cuando se realicen las primeras inyecciones de haces de protones, seguidas de las primeras colisiones de haces a finales de octubre de 2.009.

REFERENCIAS

- [1] "Construcción de un prototipo de cámara de deriva para el experimento CMS". M. Daniel et al.. Informes Técnicos Ciemat 828. Mayo 1.997.
- [2] "Construction and test of the final CMS barrel drift tube muon chamber prototype". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 480 (2002). 658-669. CMS Collaboration.
- [3] <http://www.wae.ciemat.es/>
- [4] Sony CCD Black and White Video Camera Module XC-75/75CE. Manual.1.992.
- [5] Arquitectura y Urbanismo Industrial. Heredia Scasso, Rafael. Universidad Politécnica de Madrid. 1.993.
- [6] "Results of mechanical calculations and test on muon chambers". Benettoni, Massimo. Ufficio tecnico. INFN Padova. February 1.999.
- [7] Präzisionsmessungen an Myondriftkammern für den CMS-Detektor und die Bedeutung des Myonsystems für die Higgs-Suche am LHC. Hermann, Sven. 2004. Aachen, Techn. Hochsch.
- [8] GARFIELD, a Drift Chamber Simulation Program User's Guide, Version 5.13, R.Veenhof, CERN Program Library W5050, 1995.
- [9] <http://www.hexcel.com>
- [10] <http://www.huntsman.com>
- [11] <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx>
- [12] Documentación técnica y planos de fabricación de utillaje para la fabricación de cámaras de deriva para CMS. M.Daniel, J.J. Martínez y L.Romero. CIEMAT 2.000.
- [13] <http://www.geomechanics.com/dspproduct.cfm?prid=24>
- [14] <http://www.wae.ciemat.es/cms/ChamberConsDb>
- [15] Short manual for Single Channel Wire Tension Meter WTM-01.Hans Reithler. 1.997.
- [16] Short manual for multichannel Wire Tension Meter WTM-64.Sven Hermann.2.001.
- [17] "Araldite 2.000. Guía de selección de adhesivos". Vantico. 2.000.

- [18] Gas enclosure assembly. Massimo Benettoni. 2.000
- [19] "Procedimientos de control de calidad de las cámaras de muones del experimento CMS construídas en el CIEMAT". M.C. Fouz, J. Puerta. Informe Técnico CIEMAT. Enero 2.004.
- [20] Quality Control Procedures Applied to Test the Performance of de CMS Muon Drift Chambers Built at CIEMAT. M.C. Fouz, J.Puerta.. CMS NOTE; (012), 2.004.
- [21] <http://www.renishaw.es/es/6446.aspx>
- [22] Control on the measurements of the position of the wires for the CMS muon layers. Javier Berdugo. 2.000.
- [23] CAEN. Costruzioni Apparecchiature Elettroniche Nucleari. <http://www.caen.it>
- [24] "Detectores de deriva". I. Durán, L. Martínez Laso. CIEMAT 632. Madrid 1.989.
- [25] Estudio sobre las cámaras de tubos de deriva para el espectrómetro de muones del experimento CMS. Jesús Puerta Pelayo. Tesis Doctoral 2.004.
- [26] Estructura soporte para transporte de cámaras de deriva. Begoña Ahedo. Unidad de Ingeniería Ciemat. 2001.
- [27] <http://www.lvdtd.co.uk/pdf/AML-IE.pdf>
- [28] "The CMS muon project. CMS Technical Design Report". CERN/LHCC 97-32, CMS TDR 3. 15 Diciembre 1.997.

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES

- Se ha puesto a punto, inicialmente, un procedimiento de fabricación artesanal de cámaras de deriva para L3.
- Se ha construido el utillaje e implantado el proceso de producción artesanal, construyéndose 96 cámaras Z.
- Se han diseñado procedimientos de control de calidad, que han sido aplicados a dichas cámaras.
- Se han diseñado, construido y ensayado tres prototipos de cámaras de deriva para CMS, y se ha colaborado además en el diseño, construcción y ensayo de un cuarto prototipo, lo que ha permitido el ensayo de sus propiedades mecánicas, la verificación de su funcionamiento y el desarrollo del proceso de fabricación y montaje.
- Se ha estudiado la conductividad térmica del primer prototipo, desarrollando un dispositivo experimental para este fin y realizando los ensayos correspondientes.
- A partir de los resultados de los ensayos anteriores, se ha estimado el salto térmico total en el detector CMS.
- Se ha determinado que la refrigeración en aire no es aceptable por la compacidad del detector y se ha determinado la necesidad del empleo de un fluido caloportador de mayor capacidad calorífica.
- Se ha diseñado y construido utillaje para la fabricación de los distintos prototipos y se ha verificado su bondad, mediante las pruebas realizadas en su fabricación. Se han determinado, además, los tiempos de ejecución y las necesidades de personal cualificado.
- Se han puesto a punto los procedimientos de control de calidad de posicionado de hilos, estanqueidad y alta tensión, verificando que son adecuados a las tolerancias prescritas para los prototipos.

- Se han diseñado y construido 3 mesas de gran precisión para el montaje de supercapas y ensamblaje de cámaras de deriva.
- Se ha propuesto un sistema de fabricación en serie de las cámaras, incluyendo utillaje y métodos de control de calidad y se ha comprobado el cumplimiento de las tolerancias admitidas en las cámaras, validándose dicho procedimiento como adecuado.
- Se ha modificado el diseño inicial de las cámaras, consiguiendo agilizar el procedimiento de fabricación por disminución del número de operaciones de ensamblado y asegurando la rigidez de las mismas.
- Se han producido en serie 74 cámaras, mediante el procedimiento automatizado. Estas cámaras han resultado todas ellas operativas y conforme a las especificaciones del CERN; y finalmente han sido instaladas en el detector CMS del LHC, donde están actualmente operativas.
- Se han fabricado y verificado cámaras para otros experimentos e instituciones (ICARUS, Universidad de Granada ...) y para demostraciones académicas.
- Se ha puesto en marcha una instalación en el CIEMAT que incluye todo el equipamiento necesario para la construcción mecánica de cámaras de deriva, y toda la instrumentación electrónica requerida para sus pruebas, incluyendo instalación de gas, alta tensión y sistemas de adquisición de datos con una estación de rayos cósmicos.

ANEXO

CONTROL DEL PROCESO

1.- INTRODUCCIÓN

Para poder realizar de forma automática las tareas de fabricación, los dispositivos de la planta están controlados por ordenador de tal forma que todas las mediciones, movimientos y acciones pueden ser realizados por funciones informáticas. Cada uno de estos dispositivos, está conectado a un sistema de adquisición de datos, integrado en el ordenador de control (figura 1). El fabricante de las tarjetas proporciona una librería, compuesta por funciones programadas para controlar cada una de las distintas operaciones que pueden realizarse sobre los dispositivos.



Figura 1.- PC industrial para control de la planta

Cada función asociada a una tarea, acepta un determinado número de parámetros que particularizan la acción a realizar. A su vez, el dispositivo, devuelve un retorno a la tarjeta de adquisición de datos, indicando con ello alguna circunstancia de la ejecución; desde "La tarea se realizó con éxito", hasta códigos de error asociados a algún fallo en el funcionamiento. El sistema de control de la planta es un sistema de 3 niveles: básico, intermedio y superior, gobernado por un PC industrial.

2.- NIVELES DEL PROCESO

2.1.- NIVEL BÁSICO

Es el nivel más bajo de control del hardware. Se trata de un proceso independiente siempre activo, que se comunica con los niveles superiores a través de la memoria del ordenador. Este nivel impide la existencia de conflictos de accesos al hardware por programas de los niveles superiores de control que estén activos simultáneamente, proporcionando seguridad a través de sus tarjetas de control ante órdenes erróneas que puedan dañarlo (funcionamiento de motores a potencia máxima, cambio del sentido de giro de motores, etc...).

2.2.- NIVEL INTERMEDIO

Está constituido por los programas que realizan tareas determinadas (medida de hilos, dispensado de pegamento...), uno por cada operación automática de la producción. Los procesos de este nivel no permanecen siempre activos, teniéndose que iniciar y finalizar cada programa (figura 2).

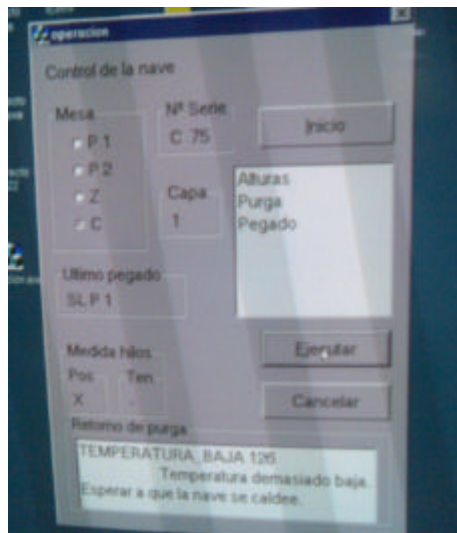


Figura 2.- Programas de tareas en la pantalla del ordenador de control

El control intermedio lleva implementado medidas para la seguridad de las operaciones de fabricación, tales como señales luminosas o interruptores de protección (interlock).

2.3.- NIVEL SUPERIOR

El nivel superior organiza y ordena el proceso productivo, garantizando su ejecución con la realización en el orden correcto de todas las operaciones; de tal forma, que no es posible el inicio de una tarea sin haber completado la anterior. Activa el proceso de nivel intermedio que se comunica con el nivel básico de control.

Este nivel es un proceso multitarea orientado al usuario, que proporciona un interfaz gráfico con el operario, al objeto de facilitar la correcta ejecución de las operaciones de fabricación. Es decir, mejora la comunicación entre los operarios de la planta y los automatismos existentes en ella, por lo que la programación de sus pantallas es fundamental (figura 3).

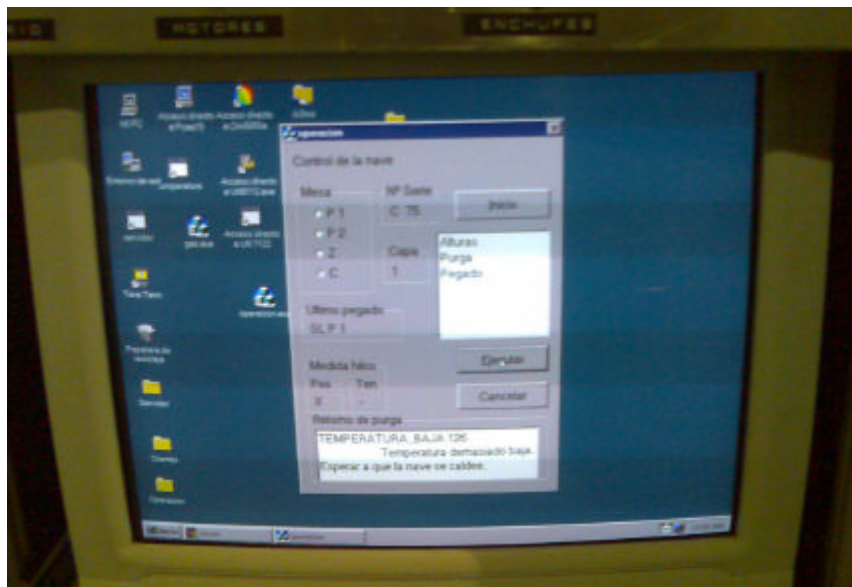


Figura 3.- Pantalla multitarea en el ordenador de control

La hipótesis de partida es un conocimiento elemental de informática del personal implicado en la fabricación. Esto implica que la estructuración de los procesos de la planta

será lo más simple y directa posible. El nivel superior de control es básicamente un intérprete de un fichero que contiene las órdenes necesarias para fabricar una supercapa en una mesa de precisión, reiterando la interpretación del fichero hasta la finalización del número de supercapas a fabricar, en cada una de las 3 mesas utilizadas en la planta para este fin.

Cada orden del fichero se corresponde con una unidad mínima de trabajo manual, de forma que este trabajo de los operarios es ordenado por el programa. La ejecución de cada orden se caracteriza por la llamada a una rutina de librería (figura 4), con los parámetros adecuados. Esta rutina retorna un número entero que determina el comportamiento posterior del programa.

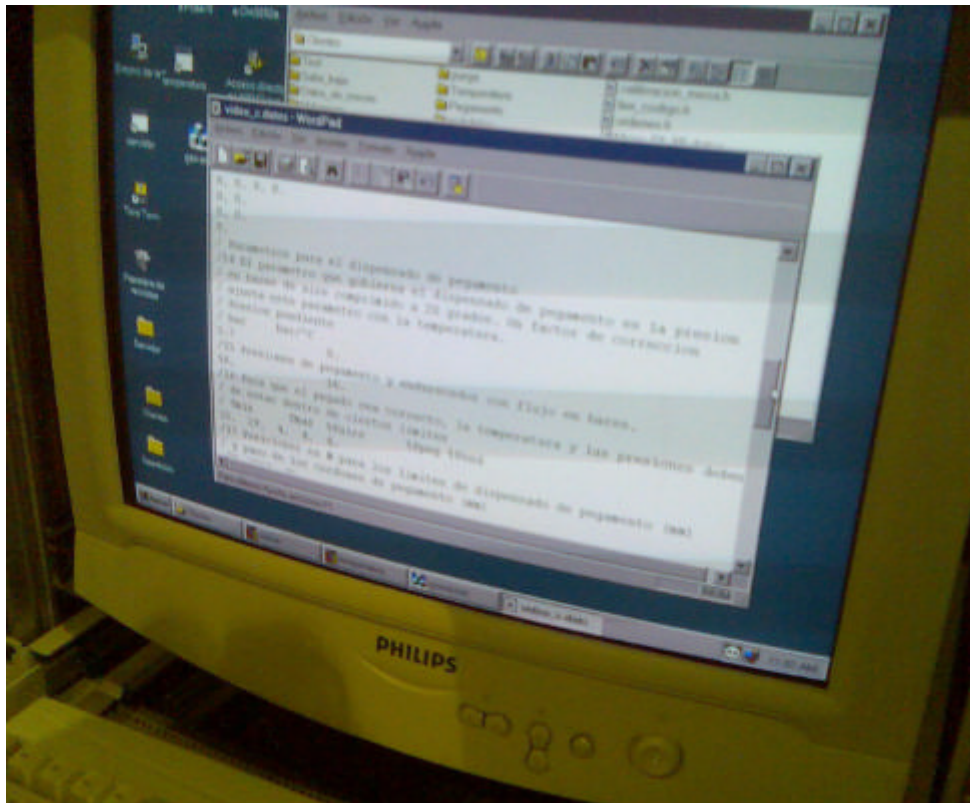


Figura 4.- Subrutina de dispensado de adhesivo en la pantalla del ordenador de control

En el ordenador la pantalla del nivel superior tendrá diversos campos:

- 1.- Descripción de la orden. Campo alfanumérico no editable.
- 2.- Información para el operario. Campo alfanumérico no editable.

3.- Ejecución. Se puede actuar sobre él.

4.- Señal luminosa de actividad. No se puede actuar sobre él.

El formato de las órdenes del fichero consta de la definición de la rutina de librería a ejecutar junto con los parámetros adecuados, y de la información alfanumérica a mostrar al operario.

A continuación se muestra un ejemplo de orden. Se puede observar cómo se incluyen en ella los comentarios dirigidos al operario. Esto permite una gran flexibilidad, pudiéndose modificar la comunicación sin volver a compilar el programa.

```

#include<afxwin.h>
#include<strstrea.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <stdio.h>
#if defined PCAE15
#include "d:\programas de ccaml\ficheros\mail_slots.h"
#include "d:\programas de ccaml\ficheros\ordenes.h"
#include "d:\programas de ccaml\ficheros\calibracion_mesa.h"
#include "d:\programas de ccaml\ficheros\retornos.h"
#elif defined PCAE8
#include "c:\luciano\ficheros\ordenes.h"
#include "c:\luciano\ficheros\calibracion_mesa.h"
#include "c:\luciano\ficheros\mail_slots.h"
#include "c:\luciano\ficheros\retornos.h"
#endif

// Define some initial values
HANDLE slot_remoto;
HANDLE slot_local;
int ordinal_local;
int num_cliente;
int mesa,inicio,numero_de_serie;
int numero_de_capa,ch_vig,test,estado;
char tipo_de_camara[4],ultimo_hito[32];

void main(int npar, char *pchar[], char *penv[])
{
    FILE *pfl;
    int mascara_de_mesa[4]={0xf,0xf0,0xf00,0xf000};
    float pres_peg,pres_end;
    float pres_aire;
    long lDesPos;
    long velx,vely;
    long slow_x,slow_y;
    unsigned long acelx= 1200L;
    unsigned long acely= 8913L;
    int cuentas_aire,w_start_c,w_end_c;
    int numero_cordones,n_max_cordones;
    int temp_mesa;
    BOOL origenw,aborta;
    float posiciony,f1;
    float pres_aire_set;
    int a1,a2,a3;
    _calibracion_mesa cal_mesa;
    int resp;
    char sKey;
    char *nombre_slot_cliente = "\\.\mailslot\pegamento";
    char nombre_slot_servidor[100];
    char nombre_fichero_calib[100];
    char nombre_fichero_chapa[100];
    char componente[100];
    char line[100];
    char buff_cl[47];
    long valor =314159;
    char fichero_de_pegado[100];
    char dbuffer [9];
    char tbuffer [9];
    BOOL v3v_cargando;
    // long tiempo;

    strcpy(ultimo_hito,PEGAR);
    if (npar!=4)
        cierra_servidor(SAL_SOLO,
            NUM_PARAMETROS,"Error en el numero de parametros");
    sscanf(pchar[1],"%d",&mesa);
    sscanf(pchar[2],"%d",&numero_de_capa);
    sscanf(pchar[3],"%d",&ch_vig);
    /* ch_vig vale 1 si se dispensa pegamento sobre las vigas, es decir,
    se pega una chapa.Por tanto PEGA_CHAPA == 1 y PEGA_VIGAS == 0 */
    if(mesa<0 || mesa>3)
        cierra_servidor(SAL_SOLO,
            ID_MESA_ERRONEO,"Mesa ilegal");
    /// printf("Punto 1\n");
    al=lee_fichero_raiz(nombre_slot_servidor,nombre_fichero_calib);
    if(al!=SIM_ERROR)
        cierra_servidor(SAL_SOLO, al, "Error en fichero raiz");
    numero_de_capa--;
    if(numero_de_capa<-1 || numero_de_capa>3)

```



```

        cierra_servidor(SAL_SOLO, NUM_CAPA_ERRONEO, "Capa ilegal");
/* La variable global ch_vig indica lo que se quiere pegar
actualmente ( 1 si chapa, 0 si vigas). La variable global estado,
que se carga del fichero de estado "ficheros.txt) indica el ultimo
pegado realizado ( 1 si chapa, 0 si vigas), que ha de ser el
contrario del actual. */
if(ch_vig==estado && mesa!=MESA_C)
    cierra_servidor(SAL_SOLO, ERROR_DE_SINCRONISMO,
        "Error en sincronismo");
slow_x=100000;
slow_y=100000;
velx = 1000000L;
vely = 1000000L;
printf("Abre fich calib: %s\n",nombre_fichero_calib);
al=lee_calibracion_mesa(nombre_fichero_calib, &cal_mesa);
if(al!=SIN_ERROR)
    cierra_servidor(SAL_SOLO, al, "Error en fichero de calibracion");

//Nombra al fichero de datos
strcpy(fichero_de_pegado,DIR_DATOS_DE_PEGADO);
strcat(fichero_de_pegado,"Pegado_");
switch(mesa)
{
case 0:
    strcat(fichero_de_pegado,"P1_");
    break;
case 1:
    strcat(fichero_de_pegado,"P2_");
    break;
case 2:
    strcat(fichero_de_pegado,"Z_");
    break;
case 3:
    strcat(fichero_de_pegado,"C_");
    break;
}
sprintf(line,"%03d",numero_de_serie);
strcat(fichero_de_pegado,line);
strcat(fichero_de_pegado,".datos");

// Determina el componente a pegar
if(mesa==MESA_P1)
    strcpy(nombre_fichero_chapa,FICHERO_CHAPA_P1);
else if(mesa==MESA_P2)
    strcpy(nombre_fichero_chapa,FICHERO_CHAPA_P2);
else if(mesa==MESA_Z)
    strcpy(nombre_fichero_chapa,FICHERO_CHAPA_Z);
else if(mesa==MESA_C)
    strcpy(nombre_fichero_chapa,FICHERO_CHAPA_C);
if((pfl=fopen(nombre_fichero_chapa,"r"))!=NULL)
{
    while(fgets(line,100,pfl))
    {
        if(line[0]!='/') continue;
        sscanf(line,"%d %s",&al,componente);
        break;
    }
    fclose(pfl);
    if(al!=mesa) cierra_servidor(SAL_SOLO, MESA_CONFUNDIDA,
        "Mesa de purga distinta de chapa");*/
}
else strcpy(componente,
    "No hay fichero de chapa disponible\n");

// Creacion de un slot local para las respuestas del servidor
Makeslot(nombre_slot_cliente);
// Conexion con el slot remoto del servidor
if (!Connectslot(nombre_slot_servidor))
{
    CloseHandle(slot_local);
    cierra_servidor(SAL_SOLO, NO_SERVER_MAILSLLOT,
        "Error al conectar el mailslot del servidor");
}

/ Primera orden
// ABRIR      0      0      Mesa      Mailslot      Error      0      Slot
sprintf(buff_cl,"%c 0 0 %d %s",ABRIR,mesa,nombre_slot_cliente);
resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &num_cliente);
printf("xx %s %d\n",buff_cl,resp);
2

```

```

if (resp!=SIN_ERROR)
{
    CloseHandle(slot_local);
    CloseHandle(slot_remoto);
    if (resp==LIMITE_ACTIVADO) cierra_servidor(SAL_SOLO, LIMITE_ACTIVADO,
        "Coordinatografo con algun limite activo");
    cierra_servidor(SAL_SOLO, NO_OPEN_SERVER,
        "Error al abrir el mailslot del servidor");
}
al=comprueba_motores();
if (al!=SIN_ERROR) cierra_servidor(CIERRA_Y_SAL,al,"Error en motores");

// Calcula el numero maximo de cordones para el volumen de pegamento
// de los cilindros
cal_mesa.n_hilos[numero_de_capa]+=1;
n_max_cordones=cal_mesa.max_cordones*cal_mesa.vel_rapida/VELOCIDAD_MAX;
printf("nº hilos %d\n" "max_hilos %d\n",cal_mesa.n_hilos[numero_de_capa],
    n_max_cordones);
// Si el total es mayor que el maximo de cordones se hace en 2 etapas
if (cal_mesa.n_hilos[numero_de_capa]>n_max_cordones)
{
    // En la 1 etapa se pone el maximo
    numero_cordones=n_max_cordones;
    // En la 2 etapa se pone el resto
    cal_mesa.n_hilos[numero_de_capa]-=n_max_cordones;
    // Solo puede haber 2 etapas, y en la mesa de camaras
    if (mesa<3 || cal_mesa.n_hilos[numero_de_capa]>n_max_cordones)
        cierra_servidor(CIERRA_Y_SAL,
            NUMERO_CORDONES_EXCESIVO,"Numero de cordones excesivo");
}
// Los cordones se ponen en una sola etapa
else numero_cordones=cal_mesa.n_hilos[numero_de_capa];

a2=RTEMP_MESA;
sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",GETVAL,num_cliente,ordinal_local,a2);
resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &temp_mesa);

// Procede con el dispensado de pegamento
// Pone la altura adecuada de la canula
// Altura de la viga en mm, dispensa sobre ella
if (ch_vig) fl=ALTURA_VIGA;
else fl=0; // Dispensa sobre la chapa
lDesPos=(long)((fl + cal_mesa.alt_peg[numero_de_capa])/cal_mesa.mmpcz);
printf("Bajemos la canula %f mm, %d cuentas\n",cal_mesa.alt_peg[numero_de_capa],lDesPos);
mueve_y_espera(EJEZPEG, lDesPos);
Sleep(1000);

// Ajusta el valor de X e Y inicial
w_start_c=(long)(cal_mesa.w_start/cal_mesa.mmpcxy);
w_end_c=(long)(cal_mesa.w_end/cal_mesa.mmpcxy);
mueve_y_espera(EJEW, w_start_c);
posiciony=cal_mesa.off_global + cal_mesa.off_peg +
    cal_mesa.off_capa[numero_de_capa];
lDesPos=(long)(posiciony / cal_mesa.mmpcxy);
mueve_y_espera(EJEY, lDesPos);
// SETVEL cliente ord Eje Valor Error ord Movimiento
sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d %d",SETVEL,num_cliente,ordinal_local,
    EJEX,cal_mesa.vel_rapida);
resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a1);

origenw=TRUE; // Se empieza a dispensar desde el origen W (HV)
aborta=FALSE;
// Bucle de las 2 etapas de poner cordones
while(1)
{
    if (cal_mesa.permiso_flux)
    {
        //Comprueba el tiempo transcurrido desde la purga
        sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",GETVAL,num_cliente,ordinal_local,TIEMPO_DE_PURGAD
*
        resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a1);
        time(&tiempo);
        if (abs(al-tiempo)>TIEMPO_PURGADO)
            cierra_servidor(PURGADO_VIEJO,"Tiempo desde el purgado excesivo");*/

        // Pon la valvula de 3 vias hacia el cabezal
        al=valvula_3vias(V3V_DISPENSA);
        if (al!=SIN_ERROR) cierra_servidor(CIERRA_Y_SAL,al,"Error en valvula 3 vias");
    }
}

```

```

v3v_cargando=FALSE;

// Pon presion de aire comprimido
Sleep(1000);
cuentas_aire=2600;
pres_aire_set = (float)( cal_mesa.presion_aire + cal_mesa.pend_aire*
    (((float)temp_mesa/100.) - TEMPERATURA_NORMAL));
cuentas_aire=(int)(pres_aire_set * CUENTAS_BAR_AIRE);
sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d %d",SETVAL,num_cliente,ordinal_local,
    AIRE COMPRIMIDO, cuentas_aire);
resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a1);
Sleep(3000);
// Permite dispensar al cilindro
sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",SETOFF,num_cliente,ordinal_local,
    EVPCARGA);
resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a1);
// Pon el cilindro a dispensar
sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",SETON,num_cliente,ordinal_local,
    EVPDISP);
resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a1);
Sleep(100);
sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",SETOFF,num_cliente,ordinal_local,
    EVPDISP);
resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a1);
// Abre las electrovalvulas del cabezal
sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",SETON,num_cliente,ordinal_local,
    EVPCORTAR);
resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a1);
Sleep(cal_mesa.tiempo_de_purgado);
}
// Pon los cordones de pegamento
printf("n° cordones %d\n",numero_cordones);
for (al=0;al<numero_cordones;al++) // Bucle automatico
{
    if (origenw) // Mueve desde W=0 (HV) hasta FE
    {
        mueve_y_espera( EJEW, w_end_c);
        origenw=FALSE;
    }
    else // Mueve desde FE hasta HV
    {
        mueve_y_espera( EJEW, w_start_c);
        origenw=TRUE;
    }
    // Incrementa el eje y para el siguiente cordon.
    posiciony+=cal_mesa.paso_cordon;
    lDesPos=(long)(posiciony / cal_mesa.mmpcxy);
    mueve_y_espera( EJEY, lDesPos);
    // Comprueba si el interruptor de paro esta activado
    sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",
        READ,num_cliente,ordinal_local,PARO_SOFT);
    resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a3);
    if(a3) // Peticion de bucle manual
    {
        if(cal_mesa.permiso_flux)
        {
            // Cierra las electrovalvulas del cabezal
            sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",SETOFF,num_cliente,ordinal_local,
                EVPCORTAR);
            resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a2);
        }
        while(1) // Bucle manual
        {
            sKey = getch();
            while( _kbhit() ) sKey = getch();
            if(sKey=='d' || sKey=='D')
            {
                // Decrementa el eje Y y pasa al cordon anterior.
                if(al>0)
                {
                    posiciony-=cal_mesa.paso_cordon;
                    al--;
                    lDesPos=(long)(posiciony / cal_mesa.mmpcxy);
                    mueve_y_espera( EJEY, lDesPos);
                }
            }
            else if(sKey=='i' || sKey=='I')
            {
                // Incrementa el eje Y y pasa al cordon posterior.

```

```

        if(a1<(numero_cordones-1))
        {
            posiciony+=cal_mesa.paso_cordon;
            al++;
            lDesPos=(long)(posiciony / cal_mesa.mmpcxy);
            mueve_y_espera( EJEY, lDesPos);
        }
    }
    else if(sKey==ESC || sKey=='q' || sKey=='Q' )
    {
        // Comprueba si el interruptor de paro esta activado
        sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",
            READ,num_cliente,ordinal_local,PARO_SOFT);
        resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a3);
        if(!a3)
        {
            if(sKey!=ESC) aborta=TRUE;
            break; // Salida del bucle manual
        }
        else printf("Desactivar el interruptor de paro\n");
    }
    else if(sKey=='c' || sKey=='C')
    {
        if(!v3v_cargando && cal_mesa.permiso_flux)
        {
            // Quita presion de aire comprimido
            cuentas_aire=0;
            sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d %d",SETVAL,
                num_cliente,ordinal_local,
                AIRE_COMPRIMIDO, cuentas_aire);
            resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a2);
            Sleep(10000);
            // Pon la valvula de tres vias a cargar del deposito
            a2=valvula_3vias(V3V_CARGA);
            if(a2!=SIN_ERROR) cierra_servidor(CIERRA_Y_SAL,
                a2,"Error en valvula 3 vias");
            v3v_cargando=TRUE;
        }
        else printf("Orden %c no entendida\n",sKey);
    } // Fin del bucle manual
    if(cal_mesa.permiso_flux && !aborta)
    {
        if(v3v_cargando )
        {
            // Pon la valvula de 3 vias hacia el cabezal
            a2=valvula_3vias(V3V_DISPENSA);
            if(a2!=SIN_ERROR) cierra_servidor(CIERRA_Y_SAL,a2,
                "Error en valvula 3 vias");
            v3v_cargando=FALSE;
            // Pon presion de aire comprimido
            pres_aire_set=(float)( cal_mesa.presion_aire +
                cal_mesa.pend_aire*((float)temp_mesa/100.) - TEMPERATURA_NORMAL));
            cuentas_aire=(int)(pres_aire_set * CUENTAS_BAR_AIRE);
            sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d %d",SETVAL,num_cliente,ordinal_local,
                AIRE_COMPRIMIDO, cuentas_aire);
            resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a2);
            Sleep(3000);
        }
        // Abre las electrovalvulas del cabezal
        sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",SETON,num_cliente,ordinal_local,
            EVPCORTAR);
        resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a2);
        Sleep(cal_mesa.tiempo_de_purgado);
    }
    // Fin de peticion de bucle manual
    if(aborta) break;
    // Fin del bucle automatico
    cal_mesa.permiso_flux)

// Lee las presiones
lee_presiones(&pres_peg,&pres_end,&pres_aire);
// Cierra las electrovalvulas del cabezal
sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",SETOFF,num_cliente,ordinal_local,
    EVPCORTAR);
resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a1);
// Quita presion de aire comprimido
cuentas_aire=0;
sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d %d",SETVAL,num_cliente,ordinal_local,

```

```

        AIRE COMPRIMIDO, cuentas aire);
    resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a1);

    Sleep(10000);
    // Pon la valvula de tres vias a cargar del deposito
    if(!v3v_cargando )
    {
        al=valvula_3vias(V3V_CARGA);
        if(al!=SIN_ERROR) cierra_servidor(CIERRA_Y_SAL,
            al,"Error en valvula 3 vias");
    }
}
if(aborta) break;
// Comprueba si hay una segunda etapa
if(numero_cordones==n_max_cordones &&
    cal_mesa.n_hilos[numero_de_capa]>0)
{
    // Ajusta el numero de cordones de la 2 etapa
    numero_cordones=cal_mesa.n_hilos[numero_de_capa];
    // Duerme mientras se rellenan los embolos
    printf("Rellenando embolos\n");
    Sleep(cal_mesa.t_rellenado);
}
else break; // No la hay
}
if(!aborta)
{
    if (!origenw)
    {
        lDesPos=(long)((cal_mesa.w_end-400.)/cal_mesa.mmpcxy);
        mueve_y_espera( EJEZ, lDesPos);
    }
}
mueve_y_espera( EJEZPEG, -10);

// Pone a cero eje de pegamento
//CERO cliente ord Eje 0 * Error ord Movimiento
sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",CERO,num_cliente,ordinal_local,
    EJEZPEG);
resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a1);
while(al& mascara_de_mesa[mesa])
{
    sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",ESTADO,num_cliente,ordinal_local,
        EJEZPEG);
    resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a1);
    Sleep(10);
}
// Actua sobre el parpadeo de la luz de estado
if(cal_mesa.permiso_flux && (mesa!=MESA_C)&& !aborta)
{
    if(ch_vig==PEGA_CHAPA)
        sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",SETOFF,num_cliente,ordinal_local,
            STATUS_PP); //Si se pega una chapa, la luz parpadea
    else
        sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",SETON,num_cliente,ordinal_local,
            STATUS_PP); //Si se pegan vigas, la luz no parpadea
    resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a1);
}
/* Temporalmente anulado
/DESBLOQUEA cliente ord Reg Estado Error ord Valor
sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",DESBLOQUEA,num_cliente,
    ordinal_local,SEMAFORO_AIRE);
resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a1);
if(resp==SEMAFORO_AJENO) cierra_servidor(CIERRA_Y_SAL,
    ERROR_DE_SEMAFORO,"Se intenta desbloquear un semaforo ajeno");*/

// CERRAR cliente ord 0 0 Error ord 0
sprintf(buff_cl,"%c %d %d %d 0",CERRAR,num_cliente,ordinal_local);
resp=manda_mensaje(buff_cl, &ordinal_local, &a1);
CloseHandle(slot_local);
CloseHandle(slot_remoto);
if(aborta)
    cierra_servidor(SAL_SOLO,PROGRAMA_ABORTADO,"Pegado abortado");
if(cal_mesa.permiso_flux)
{
    // Escribe el fichero de datos
    if((pfl=fopen(fichero_de_pegado,"a+"))==NULL)
        cierra_servidor(SAL_SOLO,

```

```

        ERROR ABRIR_FICHERO, "Fichero de pegado no abierto");
    _strdate( dbuffer );
    _strtime( tbuffer );
    switch(mesa)
    {
    case 0:
        fprintf(pfl, "\nPegado Mesa P1, sn: %03d\n", numero_de_serie);
        break;
    case 1:
        fprintf(pfl, "\nPegado Mesa P2, sn: %03d\n", numero_de_serie);
        break;
    case 2:
        fprintf(pfl, "\nPegado Mesa 3, sn: %03d\n", numero_de_serie);
        break;
    case 3:
        fprintf(pfl, "\nPegado Mesa C, sn: %03d\n", numero_de_serie);
        break;
    }
    if(ch_vig==PEGA_CHAPA)
    {
        fprintf(pfl, "Pegado de chapa a vigas\n");
        fprintf(pfl, "Nº de chapa a pegar: %s\n", componente);
    }
    else
    {
        fprintf(pfl, "Pegado de vigas a chapa\n");
        if(numero_de_capa==0) fprintf(pfl,
            "Nº de chapa sobre la que se pega: %s\n",
            componente);
    }
    fprintf(pfl, "Capa %d (1-4)\n", numero_de_capa+1);
    fprintf(pfl, "Fecha y hora termino %s %s\n", dbuffer, tbuffer);
    fprintf(pfl, "Presiones al termino\n");
    fprintf(pfl, "Peg: %7.2f\nEnd: %7.2f\nAire: %7.2f\n",
        pres_peg, pres_end, pres_aire);
    fprintf(pfl, "\n");
    fclose(pfl);
    if(mesa!=MESA_C)
    {
        /* La variable global ch_vig indica lo que se quiere pegar
        actualmente ( 1 si chapa, 0 si vigas). La variable global
        estado, que se carga del fichero de estado "ficheros.txt)
        indica el ultimo pegado realizado
        Cuando se pega la chapa se incrementa la capa y se
        aserta el campo de estado de ficheros.txt */
        if(ch_vig==PEGA_CHAPA)
            actualiza_fichero_raiz( RES_TEST, TRUE, TRUE);
        /* Cuando se pegan vigas, no se incrementa la capa y se
        resetea el campo de estado de ficheros.txt */
        else actualiza_fichero_raiz( RES_TEST, FALSE, FALSE);
    }
    else actualiza_fichero_raiz( RES_TEST, TRUE, FALSE);
}
terra_servidor(SAL_SOLO, SIN_ERROR, "Salida sin error");

```